



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO

FELIPE BEZERRA VIEIRA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CONTROLADORES
FUZZY E PI PARA UM SISTEMA DE TANQUE

MOSSORÓ – RN

2017

FELIPE BEZERRA VIEIRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CONTROLADORES
FUZZY E PI PARA UM SISTEMA DE TANQUE**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Roberto Bastos
Guerra Vale - UFERSA

Coorientadora: Profa. Dra. Danielle Simone da
Silva Casillo - UFERSA

MOSSORÓ – RN

2017

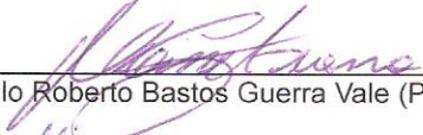
FELIPE BEZERRA VIEIRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CONTROLADORES
FUZZY E PI PARA UM SISTEMA DE TANQUE**

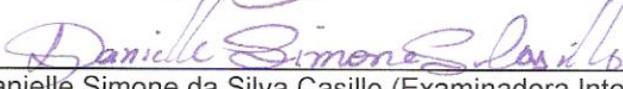
Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

APROVADA EM: 21/02/2017.

BANCA EXAMINADORA



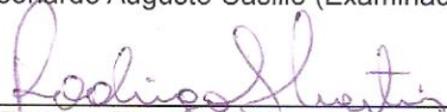
Prof. Dr. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale (Presidente e Orientador)



Profa. Dra. Danielle Simone da Silva Casillo (Examinadora Interna e coorientadora - UFERSA)



Prof. Dr. Leonardo Augusto Casillo (Examinador Interno - UFERSA)



Prof. Dr. Rodrigo Siqueira Martins (Examinador externo - IFFRN)

Mossoró, 21 de fevereiro de 2017

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

V313e Vieira, Felipe.
ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CONTROLADORES FUZZY E
PI PARA UM SISTEMA DE TANQUE / Felipe Vieira. -
2017.
79 f. : il.

Orientador: Marcelo Vale.
Coorientadora: Danielle Casillo.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ambiente, Tecnologia e Sociedade, 2017.

1. Modelagem. 2. Fuzzy. 3. PID. I. Vale,
Marcelo , orient. II. Casillo, Danielle, co-
orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

DEDICATÓRIA

Aos meus familiares, que me deram todo o suporte para me tornar o que eu sou.

Aos meus amigos, por sempre me apoiarem.

Ao meu orientador, a minha coorientadora e aos professores que me forneceram o conhecimento suficiente para terminar esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar tudo o que eu sou e tudo o que me cerca; por me dar forças nos momentos de desânimos e pela oportunidade de realizar esse trabalho.

À família, pois sem ela e sua estrutura sólida, não seria capaz de concluir. À minha mãe, pelas brigas e reclamações; ao meu pai, que sempre acatou minhas decisões; a minhas irmãs, que sempre estiveram presentes; e ao meu avô Airton, por sempre acreditar no meu potencial.

Ao orientador, Prof. Dr. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale, pela confiança, dedicação, por todo o conhecimento adquirido e, principalmente, pela paciência.

À Profa. Dra. Danielle Simone da Silva Casillo, pelo incentivo como coorientadora.

Aos Professores da banca, pela disponibilidade em fazer parte da minha banca examinadora, assim como em dar contribuições.

Aos meus colegas, que estiveram comigo em momentos de estresse, estudando, compartilhando os seus conhecimentos, me dando apoio em todos os momentos de desânimos e, também, dividindo muitos momentos alegres, de risadas e brincadeiras.

Aos meus professores, que me motivaram e disponibilizaram-se a passar um pouco de seu enorme conhecimento.

A instituição UFERSA, pelo serviço e estrutura disponibilizados para a realização dos experimentos desse trabalho, bem como à CAPES, pelo auxílio financeiro.

“Lembre-se que as pessoas podem
tirar tudo de você,
menos o seu conhecimento.”
(Albert Einstein)

RESUMO

No parque industrial atual, existe uma série de problemas com nível de dificuldade variada, um dos mais recorrentes é o de controle de níveis de reservatórios ou tanques. Esses sistemas contêm alguns fatores que dificultam o seu controle. Um dos principais fatores é a não linearidade do sistema, que pode prejudicar o desempenho de controladores clássicos como o PID. Um dos objetivos desse trabalho é a construção de tanques de formato variados, o levantamento dos modelos matemáticos, a elaboração de um simulador no ambiente Simulink[®], e o estudo de controladores para os sistemas construídos. A modelagem correta é de vital importância para o desenvolvimento dos sistemas simulados, pois uma modelagem pouco eficaz pode invalidar o estudo e conseqüentemente a análise de controladores no sistema. Será feito um estudo comparativo entre técnicas de controle clássico e o controlador Fuzzy, realizando uma comparação entre o comportamento dos controladores.

Palavras-Chave: Modelagem, Fuzzy, PID

ABSTRACT

In the current industrial park, there is a number of problems with varied level of difficulty, one of the most recurrent is the control of levels of reservoirs or tanks. These systems contain some factors that hinder their control. One of the objectives of this work is the construction of various format tanks, which can impair the performance of classical controllers such as PID. One of the objectives of the work is a tank construction, a modeling test and thus building a simulator without Simulink[®]. The correct modeling has vital importance for the development of simulated systems, for poorly designed modeling invalidate this study and possible validation of controllers in the system. A comparative study will be made between classic control techniques and the Fuzzy controller, performing a comparison between the behavior of the controllers.

Keywords: Modeling, Fuzzy, PID.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Regras para tomada de decisão.....	41
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma para Definição de Modelo.	20
Figura 2: Fluxograma do controlador PID.	22
Figura 3: Fluxograma do controlador Fuzzy.	23
Figura 4: Inferência Fuzzy.	25
Figura 5: Imagens dos orifícios de entrada e de saída dos tanques	28
Figura 6: Formato do tanque Proposto.	30
Figura 7: Simulador tanque da Quanser®.	31
Figura 8: Planta Não Linear.	32
Figura 9: Simulador do tanque proposto.	33
Figura 10: Kit didático da Quanser®.	34
Figura 11: Tanque proposto.	35
Figura 12: Sensor MPX5010.	36
Figura 13: Arduino Uno®.	36
Figura 14: Sistema utilizado.	37
Figura 15: Drive Quanser®.	38
Figura 16: Malha de controle para controle Fuzzy.	39
Figura 17: Funções de pertinência da variável erro.	40
Figura 18: Funções de pertinência das variáveis derivada do erro.	40
Figura 19: Funções de pertinência das variáveis saída.	41
Figura 20: Saída do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.	44
Figura 21: Saída de tensão do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.	44
Figura 22: Erro Quadrático do controlador PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.	45
Figura 23: Saída do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.	46
Figura 24: Saída de tensão do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.	47
Figura 25: Erro Quadrático do controlador Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.	47
Figura 26: Saída do controlador PI, do tanque da Quanser®.	48
Figura 27: Saída de tensão do controlador PI, do tanque da Quanser®.	48
Figura 28: Erro Quadrático do controlador PI, do tanque da Quanser®.	49
Figura 29: Saída do controlador Fuzzy, do tanque da Quanser®.	49
Figura 30: Saída de tensão do controlador Fuzzy, do tanque da Quanser®.	50
Figura 31: Erro Quadrático do controlador Fuzzy, do tanque da Quanser®.	50
Figura 32: Saída do PI para regiões próximo a 15 cm de altura, do tanque proposto.	51

Figura 33: Saída de tensão do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.	52
Figura 34: Erro Quadrático do controlador PI para regiões próximo a 15 cm de altura, do tanque proposto.	52
Figura 35: Saída do Fuzzy para regiões próximo a 15 cm de altura, do tanque proposto.	53
Figura 36: Saída de tensão do Fuzzy para regiões próximo a 15 cm de altura, do tanque proposto.	53
Figura 37: Erro Quadrático do controlador Fuzzy para regiões próximo a 15 cm de altura, do tanque proposto.	54
Figura 38: Saída do controlador PI, do tanque proposto.	54
Figura 39: Saída de tensão do controlador PI, do tanque proposto.	55
Figura 40: Erro Quadrático do controlador PI para todo o tanque, do tanque proposto.	55
Figura 41: Saída do controlador Fuzzy, do tanque proposto.	56
Figura 42: Saída de tensão do controlador Fuzzy, do tanque proposto.	56
Figura 43: Erro Quadrático do controlador Fuzzy para todo o tanque, do tanque proposto.	57
Figura 44: Saída do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.	58
Figura 45: Saída de tensão do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.	58
Figura 46: Erro Quadrático do controlador PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.	59
Figura 47: Saída do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.	60
Figura 48: Saída de tensão do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.	61
Figura 49: Erro Quadrático do controlador Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.	61
Figura 50: Saída do PI, do tanque da Quanser®.	62
Figura 51: Saída de tensão do PI, do tanque da Quanser®.	63
Figura 52: Erro Quadrático do controlador PI, do tanque da Quanser®.	63
Figura 53: Saída do Fuzzy, do tanque da Quanser®.	64
Figura 54: Saída de tensão do Fuzzy, do tanque da Quanser®.	64
Figura 55: Erro Quadrático do controlador Fuzzy, do tanque da Quanser®.	65
Figura 56: Saída do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.	65
Figura 57: Saída de tensão do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.	66
Figura 58: Erro Quadrático do controlador PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.	66
Figura 59: Saída do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.	67

Figura 60:Saída de tensão do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.	67
Figura 61: Erro Quadrático do controlador Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.	68
Figura 62: Saída do PI, do tanque proposto.	68
Figura 63: Saída de tensão do PI, do tanque proposto.	69
Figura 64:Erro Quadrático do controlador PI, do tanque proposto.	69
Figura 65:Saída do Fuzzy, do tanque proposto.	70
Figura 66: Saída de tensão do Fuzzy, do tanque proposto.	70
Figura 67:Erro Quadrático do controlador Fuzzy, do tanque proposto.	71

NOMENCLATURA

Letras Latinas

K_p, K_i, K_d	– Parâmetros do controlador PID	
V_p	– Tensão aplicada na bomba	(Volt)
K_m	– Constante da bomba	(Q/Volt)
g	– Gravidade	(m/s ²)
L	– altura do volume de água	(h)
L'	– variação do nível dos tanques	(Q/s)
V'	– Variação volumétrica	(m ³ /s)
V_{out}	– Vazão de saída	(cm/s)
F_{out}	– Força de saída	(cm ³ /s)
F_{in}	– Força de entrada	(cm ³ /s)
a	– Área do orifício de saída	(cm ²)
A	– Área da secção transversal	(cm ²)

Abreviações

PID	– Proporcional Integral Derivativo
PI	– Proporcional Integral
FAM	– Matriz de Associação Fuzzy
ENG	– Erro Negativo Grande
ENP	– Erro Negativo Pequeno
EZ	– Erro Zero
EPP	– Erro Positivo Pequeno
EPG	– Erro Positivo Grande
DENG	– Derivada Erro Negativo Grande
DENP	– Derivada Erro Negativo Pequeno
DEZ	– Derivada Erro Zero
DEPP	– Derivada Erro Positivo Pequeno
DEPG	– Derivada Erro Positivo Grande

Siglas

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-árido

PPGSCA – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1. Gerais	15
1.1.2. Específicos	15
1.2 Organização do trabalho.....	15
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 Revisão Bibliográfica	17
2.2 Modelagem	19
2.3 PID	21
2.4 Fuzzy	22
2.4.1 Etapas Fuzzy	23
2.4.2 Codificação	23
2.4.3 Inferência.....	24
2.4.4 Decodificação.....	25
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Modelagens Dos Tanques	27
3.2 Implementação Do Sistema Simulado E Real	30
3.2.1 Sistema Simulado.....	30
3.2.2 SistemaReal.....	34
3.3 Controladores.....	38
3.3.1 PI.....	38
3.3.2 Fuzzy.....	39
3.3.3 Critérios de Análise.....	42
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS	43
4.1 Resultados Referentes Às Simulações.....	43

4.1.1 Tanque da Quanser®.....	43
4.1.2 Tanque Proposto	51
4.2 Resultados Referentes Aos Testes Práticos	57
4.2.1 Tanque da Quanser®.....	58
4.2.2 Tanque Proposto	65
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	72
5.1 Trabalhos Futuros	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O interesse por técnicas de controle multivariável ou avançadas tem crescido nos últimos anos (Johansson, 2000). Essas técnicas de controle mais avançadas requerem um maior esforço computacional e de implementação quando comparado a técnicas de controle clássicas. Com isso, para conseguirmos sabermos se o sistema se beneficiaria com a implementação das técnicas avançadas, é necessário a comparação das mesmas com técnicas clássicas, para avaliar seus resultados no processo de controle, é com isso saber se é benéfico a implementação ou não no sistema.

O trabalho com tanques é de elevada importância, pois a utilização deles é bastante comum em escala industrial, principalmente nos ramos químico, petroquímico, de celulose e de alimentos (Garcia, 2007). Dessa forma, trabalhos com tanques podem vir a solucionar problemas em sistemas reais, gerando relevância.

Neste trabalho, serão utilizadas duas plantas de tanque, para a aplicação dos controladores PI e Fuzzy, é avaliação das suas respostas quanto a controle de nível. Uma das plantas que será utilizada nesse projeto, foi desenvolvida em escala laboratorial em um formato trapezoidal, é a outra utilizaremos um dos tanques do kit didático de tanques da Quanser®.

Um ponto relevante na avaliação do projeto de controladores em tanques são os formatos dos mesmos. Muitos trabalhos se utilizam de tanques com forma cilíndrica, pois facilita no processo de modelagem, uma vez que os tanques não alteram a área da seção transversal. Mas pode acontecer dos tanques não conseguirem obedecer a esse formato em sistemas reais. Com isso, existe a necessidade de trabalhos que abordem tanques com formatos diferentes.

Sistemas de tanques reais são por natureza não lineares. Para controlá-los, podem-se empregar técnicas de controle linear, não linear ou a hibridização dessas técnicas (Goder & Pelletier 1996, Maia & Resende 1998, Araújo 2002, Barrado et al. 2003, Fonseca 2005, Soto 2006, Cavalcanti 2008, Fonseca et al. 2012). A aplicação da lógica Fuzzy vem se mostrando uma saída muito interessante para superar as limitações dos controladores clássicos, como o Proporcional Integral Derivativo (PID). Segundo Silva (2002), esse é um controlador bastante usual dentro das indústrias, atualmente, muito devido à sua vasta gama de aplicações e fácil instalação. Os motivos para o Fuzzy estar se tornando uma alternativa viável é que ele consegue trabalhar com as não

linearidades dos sistemas reais, superando, assim, um dos grandes problemas dos sistemas clássicos, que perdem eficiência com perturbações e erros de modelagem, e consequentemente geram controladores que não atendem satisfatoriamente ao seu objetivo, segundo Figueiredo & Jota (2004).

Comparando os controladores lineares e não lineares, constata-se que os não lineares apresentam uma dificuldade maior de implementação, em grande parte devido a sua complexidade. Uma das dificuldades da utilização de técnicas de controle não linear é que não existe uma teoria geral sobre este tipo de controle. Normalmente, são consideradas diferentes classes de processos não lineares e experimentadas várias ferramentas matemáticas [Salgado 2008]. Além disso, há casos em que o modelo não linear é tão complexo que fica impraticável a utilização dessas técnicas de controle para o projeto de controladores com base no modelo [Barros et. al. 2006].

1.1 Objetivos

Nesse tópico iremos fazer uma exposição dos objetivos desse trabalho, dividindo em geral, aonde realizaremos uma explanação geral sobre o projeto, e o específico que descreveremos os trabalhos específicos para a realização desse trabalho.

1.1.1. Gerais

O trabalho tem como objetivo a construção de um tanque com forma estrutural diferenciada, que será utilizado em um estudo comparativo de desempenho de controladores PID e Fuzzy. Para a realização dessas atividades, é importante efetuar a modelagem matemática e o desenvolvimento de simuladores para os tanques, os quais, posteriormente, serão aplicados em sistemas reais.

1.1.2. Específicos

- Construção de um sistema de tanques;
- Modelagem do sistema no Matlab®;
- Implementação da instrumentação para o controle do processo;
- Estabelecimento de comunicação Arduino/Matlab®;
- Estudo e desenvolvimento dos controladores para sistemas de tanques;
- Comparação e análise dos resultados obtidos entre os controladores Fuzzy e PI;

1.2 Organização do trabalho

A organização do trabalho será da seguinte forma:

- Capítulo 1: Toda a parte introdutória da dissertação, contendo os objetivos, metodologia e organização do trabalho.
- Capítulo 2: Será realizada a revisão bibliográfica de todos os trabalhos de tanques pesquisados, seguindo-se do desenvolvimento de uma fundamentação teórica dos principais conteúdos imersos no trabalho.
- Capítulo 3: Serão descritos matérias e métodos utilizados no projeto.
- Capítulo 4: Serão apresentados os resultados práticos e simulados dos dois controladores implementados.
- Capítulo 5: Análise dos resultados obtidos no projeto, tanto na parte teórica quanto na parte prática. E propostos projetos futuros.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo realizada a fundamentação teórica de todo esse trabalho. Iniciaremos com os estudos que já foram realizados nessa área, na revisão bibliográfica, posteriormente iremos explicar o que é o trabalho de modelagem, e no final falaremos dos dois controladores utilizados, iniciando pelo controlador PID e posteriormente o controlador Fuzzy.

2.1 Revisão Bibliográfica

Diversos trabalhos envolvendo tanques estão presentes na literatura, com variações geométricas, aplicações reais e simuladas, e variadas aplicações de técnicas de controle.

O trabalho de Grega e Maciejczyk (1994), consiste um sistema de dois tanques acoplados, existindo, no tanque inferior, uma variação da área da secção transversal. Essa alteração causa uma mudança na dinâmica da vazão, e essa mudança é decorrência da não linearidade do sistema. O trabalho tem como foco a utilização da vazão do primeiro tanque para controlar o segundo, isso devido ao primeiro ser o que está sendo ligado à uma bomba. Para conseguir realizar o controle, houve a necessidade de aplicar as técnicas de linearização em torno do ponto de operação. Dentre as técnicas de controle aplicada foi utilizado o PID em cascata, que foi testado, analisando-se mudanças na referência (efeitos de linearização), tempo de amostragem (efeito de discretização) e saturação do termo integrativo (prevenção do efeito *wind-up*).

Guerra e Soares (2005) utilizam dois tanques, estes têm as suas áreas iguais e não possuem alteração da secção transversal. O trabalho consiste na modelagem dos tanques e comparação das atuações dos controladores. Nele foram descritos dois controladores: PID e Fuzzy-PID, para verificação dos seus parâmetros de resposta, nos quais foram avaliados principalmente o *overshoot* e o tempo de estabilização. Com posse das respostas, foi verificado que os controladores PID têm uma região de melhor atuação, porém, o Fuzzy mostrou melhor consistência em todos os pontos.

Juri Belikov (2013) desenvolve uma rede neural para gerar um modelo dos tanques utilizados e, posteriormente, utiliza esta rede para controlá-los. São utilizados dados de entrada e saída conhecidos para treinar a rede neural e, com isso, desenvolver o modelo requerido.

Nesse trabalho é utilizado um sistema de três tanques, cada um com formato diferente. O primeiro tem o formato de um cubo e é o tanque que sofre a influência da bomba. O formato do segundo é um trapézio, e o terceiro tem o formato de uma meia elipse. O controlador com base na rede neural obteve resultados satisfatórios, com pequenos *overshoots* e tempo de estabilização.

Luna Filho, Gosmann e Bauchspiess (2002) utilizaram um sistema de três tanques acoplados simultaneamente, porém, ao invés de ter acoplamento vertical, foram acoplados um ao lado do outro. O trabalho consiste na comparação entre os controladores Fuzzy e o PI. Foi usado o software Matlab[®] para o desenvolvimento dos modelos e, posteriormente, dos controladores. Nesse projeto foi constatado que o controlador Fuzzy obteve uma melhor resposta.

Luiz et. al. (1997) realizou uma comparação experimental de três tipos de controladores monovariáveis em uma planta de nível. Os controladores escolhidos foram o PI adaptativo, o preditivo e o Fuzzy. Os controladores foram submetidos ao mesmo sistema e, com isso, usando a mesma dinâmica do processo é possível avaliar da melhor maneira as suas vantagens e desvantagens. Os critérios mais avaliados foram os de complexidade computacional, desempenho de rastreamento, variação de saída de controle e mudanças na dinâmica da planta.

Hugo (2010) teve como objetivo a validação de um sistema de tanques desenvolvido, denominado STAD. O projeto desenvolveu um sistema de tanque para fins didáticos de baixo custo. Após o seu desenvolvimento, foi realizada a modelagem matemática, e posteriormente aplicou-se controlador PID para demonstrar o seu funcionamento e possíveis utilizações.

Zhou Wang (2011), percebendo, também, o grande uso do PID nas indústrias, desenvolveu um controlador Fuzzy para comparar os seus resultados e, assim, saber quais teriam melhores resultados na aplicação com níveis de tanques. Nesse trabalho, foi utilizado apenas plantas simuladas no Matlab[®]. Na análise desenvolvida, o controlador que obteve melhor resultado foi o Fuzzy.

Waurajitti et. al. (2000) utilizou um controlador Fuzzy adaptativo para realizar o controle de dois tanques em cascata. Os resultados experimentais e as simulações realizadas mostram estabilidade, pequenos erros nos seguimentos de trajetória e um rápido tempo de assentamento.

André H (2013), utilizou uma planta didática da Quanser®, na qual já são conhecidos todos os parâmetros e modelos do sistema para o desenvolvimento de um controlador. O controlador em questão é um Fuzzy com controlador proporcional e derivativo, que tem como seu sintonizador um algoritmo genético. O resultado do controlador sintonizado com algoritmo genético foi satisfatório, principalmente comparado ao mesmo com sintonia manual.

Araújo Júnior (2010) realizou um controle de dois tanques acoplados utilizando a lógica Fuzzy. O objetivo era realizar o controle do segundo tanque, e o grande diferencial desse trabalho consiste em utilizar duas fontes de alimentação distintas, modificando um pouco o padrão utilizado de apenas uma fonte de alimentação do sistema. Com essa segunda fonte de alimentação, há adição de mais uma variável de controle do sistema, modificando a sua modelagem.

2.2 Modelagem

Equações que compõe o modelo é uma aproximação do processo real. Para que seja possível realizar a modelagem, não é viável inserir todas as características do modelo real, devido a requisição de muitos esforços para incluir todas as possíveis características ao modelo. (GARCIA, 2009)

Para que ocorra a possibilidade do controle em um sistema e, principalmente, de forma adequada, é necessário que o projetista contenha as informações necessárias da dinâmica da planta, pois, com essas informações, o projetista vai escolher qual forma de controle será aplicada. Desta forma, é importante gerar um modelo matemático que represente o sistema, pois, com posse do mesmo, é possível aplicar as técnicas de controle.

Os modelos matemáticos são, de forma geral, uma das principais formas de representar um processo, um controle ou até mesmo um sistema de controle como o todo. Para um modelo ser considerado satisfatório, ele deve oferecer a mesma resposta tanto no domínio do tempo como da frequência do modelo em relação ao obtido no modelo real. No entanto, um modelo não linear que consiste em um sistema no qual, em um determinado momento, não obedece ao modelo devido a sua configuração, é necessário aplicar técnicas de linearização ou um conjunto de modelos os quais iram ajudar a remediar esse problema (GARCIA, 2009).

O processo de modelagem pode ser dividido em diversas partes, dentre as quais as principais são: seleção do modelo, determinação da estrutura, estimação dos parâmetros e validação do modelo, conforme diagrama da Figura 1.

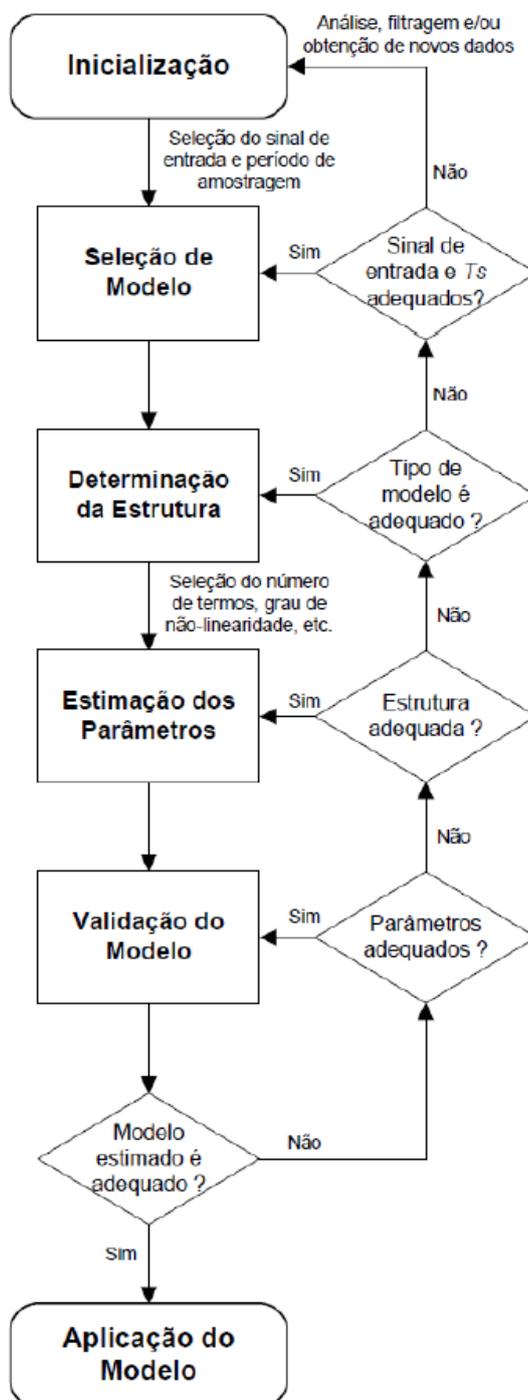


Figura 1: Fluxograma para Definição de Modelo.

Fonte: GARCIA (2009)

Pode-se definir melhor sistemas não lineares como os sistemas cujas implementações individuais são representações aleatórias e não previsíveis. Grande parte dos sistemas lineares é totalmente linear, em apenas um intervalo, se considerado ao mais infinito e menos infinito. Grande parte dos sistemas tende à não linearidade.

Dentro da engenharia de controle, quando nos referimos a sistemas não lineares, em termos gerais, existem pontos de operação nos quais os mesmos irão atuar. É possível a utilização de técnicas de aproximação do sistema para que, com isso, seja viável ser considerado um sistema linear nessa faixa. Essas técnicas são chamadas de linearização. Sabendo que, quando o sistema trabalhar fora desse ponto de operação, o mesmo se comportará de tal forma que a resposta pode não ser satisfatória, podendo ocasionar instabilidade no sistema.

Considerar um sistema totalmente linear significa dizer que obedece totalmente ao Princípio de Sobreposição dos Efeitos. “A resposta produzida pela aplicação da combinação linear de duas ou mais excitações diferentes é igual à combinação linear das respostas individuais à cada uma das excitações.” (PEARSON, 2003).

2.3 PID

O controlador PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo), consiste basicamente em um sistema com realimentação, o qual possui uma capacidade de aumentar a resposta do sistema, eliminar o erro no estado estacionário e adicionar antecipadores no sistema. Cada ação relatada vem mediante um dos componentes do PID (Bolton, 2010).

Segundo trabalhos de Normey-Rico (2001) e Takatsu et. al. (1998), a grande maioria dos controladores imersos nas indústrias são do tipo PID, chegando a estar presente em quase 95% das malhas de controle, podendo ser dos projetos mais complexos para os mais simples.

O controlador PID contém três etapas, as quais são regidas pela Equação 2.1

$$u(t) = k_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int e(t) dt \quad (2.1)$$

Descrevendo na forma discreta, a Equação 2.1 pode ser escrita conforme a Equação 2.2:

$$u(k) = K_p e(k) + \frac{K_d}{T_s} \Delta e(k) + K_i T_s \sum e(k) \quad (2.2)$$

Na Figura 2 é mostrado como funciona um sistema com o controlador PID no formato de digrama de blocos:

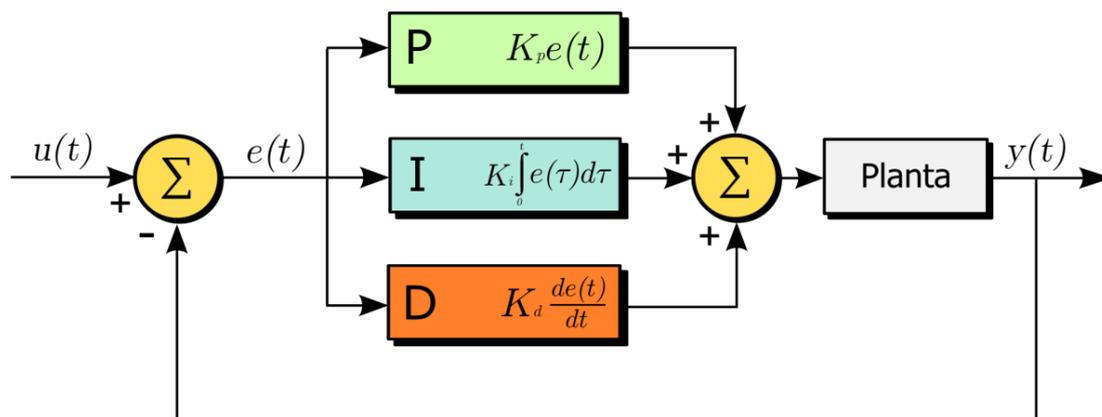


Figura 2: Fluxograma do controlador PID.

Fonte: Wikimedia Commons (2016)

Onde:

$u(t)$ = Setpoint do sistema no instante t ;

$e(t)$ = Erro do sistema no instante t ;

$y(t)$ = Resultado da saída da planta no instante t ;

K_p, K_i, K_d = Parâmetros do controlador PID;

Apesar de ser muito utilizado, o controlador PID não considera as não linearidades do sistema. Com isso, pode se perder devido a uma não linearidade do processo. Como a maioria dos sistemas reais contém não linearidades intrínsecas, então, apesar de um bom dimensionamento do PID, pode acontecer do mesmo não trabalhar bem ou divergir durante o processo. Devido a isso, os controladores com inteligência artificial se destacam por incorporarem as não linearidades do sistema.

2.4 Fuzzy

A lógica Fuzzy foi desenvolvida pelo professor Zadeh, por volta de 1960, quando desenvolveu o conceito de conjunto Fuzzy, dando início ao que se tem hoje. A utilização na área de controle é de grande valia por ser um controle com o qual se consegue obter um rápido dimensionamento com resultados excelentes, podendo, também, trabalhar com não linearidades do sistema que precisa ser controlado, e utilizando conceitos práticos para a facilitação do processo (Simões & Shaw 2001).

Com seus princípios fundamentais, a lógica Fuzzy tende a representar uma decisão humana, devido a mesma poder absorver os conhecimentos de um operador que

já tenha domínio da operação da planta, fazendo, assim, com que o controlador “aprenda” cada nuance do projeto. Os conjuntos Fuzzy são o caminho para aproximar o raciocínio humano à forma de interpretação da máquina (Camargos, 2002).

2.4.1 Etapas Fuzzy

Para o desenvolvimento de um controlador Fuzzy é necessário que se obtenha três etapas: Codificação, Inferência e Decodificação. Desta forma, cada etapa será descrita, seguindo o modelo Mamdani, como mostrado na Figura 3.

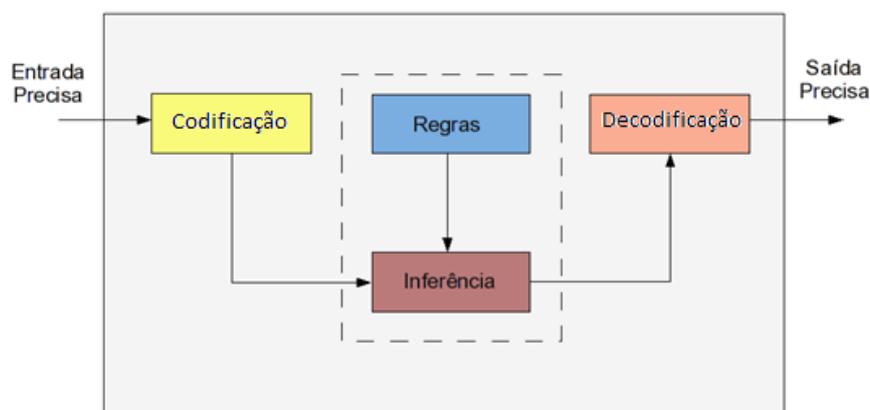


Figura 3: Fluxograma do controlador Fuzzy.

Fonte: Autoria Própria (2016)

2.4.2 Codificação

Inicialmente as entradas ao controlador Fuzzy são dadas por valores Não-Fuzzy. São gerados por sensores ou computacionalmente. Os valores de entrada obedecem à escala dimensionada pelo projetista, que vai mencionar os máximos e mínimos do sistema. Sua principal função é a transformação dos valores Não-Fuzzy das variáveis de entrada em valores Fuzzy. Outros pontos importantes são a função de pertinência e o grau de pertinência. A função é o que vai representar o comportamento do sistema, e vários são os tipos de função pertinência, como a gaussiana e a sigmoideal. Porém, as mais comuns e utilizadas são as triangulares e as trapezoidais (Simões & Shaw, 2001).

O processo de codificação pode ser dividido em etapas para o desenvolvimento do controlador. A primeira etapa vai ser a definição de quais são as variáveis que vão ser utilizadas e suas amplitudes ou universos de aplicação. Já a segunda é a escolha da função de pertinência que mais se adapta ao modo como o sistema funciona. A última etapa consiste em dar nomes às variáveis e obter as funções de pertinência.

2.4.3 Inferência

Essa é a etapa de conhecimento da Lógica Fuzzy. Nela reside a necessidade do conhecimento de um especialista, que vai interpretar o funcionamento do sistema e sua operação. Nesta etapa são realizadas também as tomadas das decisões e análise; com isso, é de vital importância que contemple todas as possíveis saídas e entradas do sistema (GUERRA, 2005).

Nessa etapa, o controlador irá interpretar as funções de pertinências e seus valores respectivos para gerar uma saída desejada. A função de pertinência é uma função que atribui valores Fuzzy para valor de um universo de discurso.

Um exemplo de inferência Fuzzy seria:

Se < variável 1 > = grande e < variável 2 > = média Então < Saída > = Média

Pode-se observar que a variável de entrada se relaciona com o valor da variável linguística. Essa é a principal característica da Lógica Fuzzy. Com a união de todas as relações possíveis entre as variáveis de controle no sistema, obtém-se uma Matriz de Associação Fuzzy (LUNA FILHO, 2002).

Depois de desenvolver toda a Matriz de Associação Fuzzy, é necessário usar um mecanismo que realizará a inferência para as associações que possuem resultados dentro da interpretação para expressão “SE (condição) ENTÃO (ação)”. O modelo de inferência mais utilizado é o Mamdani (Simões & Shaw, 2001).

O modelo Mandani tem como base os operadores MÁXIMO-MÍNIMO. O método começa observando onde a variável de controle vai cortar a função de pertinência no eixo vertical. Com isso, no ponto em que a variável cortar estará o grau de pertinência da função, podendo cortar mais de uma função de pertinência. Isso acontece com todas as variáveis de entrada. Depois dessas determinações, deve-se aplicar o t-normas e o t-conormas, que consistem em operadores clássicos de união e intersecção dos conjuntos gerados com os graus de pertinências (Simões & Shaw, 2001).

Existem vários tipos de t-normas e t-conormas. Alguns exemplos são o Probabilístico, o Weber e o Zadeh, sendo este o mais utilizado. Ele consiste em achar, primeiramente, o mínimo dos conjuntos gerados. Por exemplo, se o valor da variável cortar duas funções de pertinência, nesse primeiro momento ele irá pegar o menor valor o qual a variável cortou a função dos grupos, isso levando em consideração as duas variáveis de entrada. Com esse conjunto gerado, avalia-se na FAM (Matriz Associação

Fuzzy) a regra a que se refere. Posteriormente, ele faz a agregação das áreas das variáveis, unificando as áreas das duas e obtendo a área de saída da inferência do Fuzzy.

Um exemplo de inferência

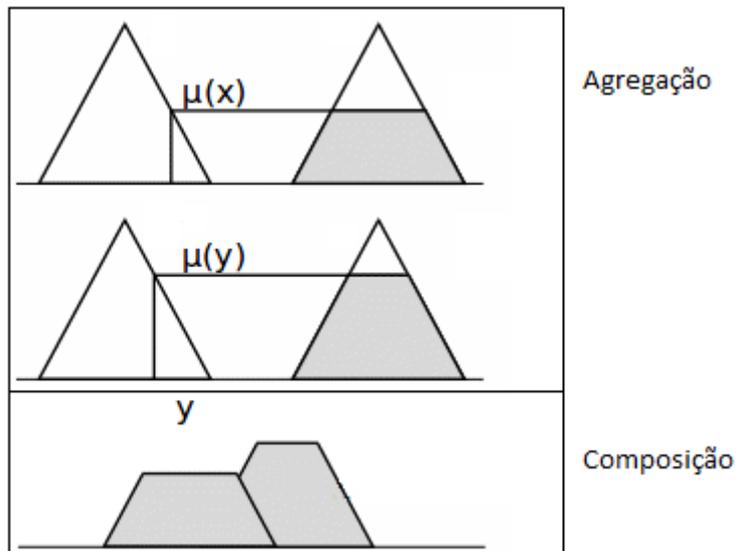


Figura 4: Inferência Fuzzy.

Fonte: Autoria própria

2.4.4 Decodificação

Após a etapa da inferência, vem a última etapa, que é a Decodificação. Nela são aplicados os valores encontrados no processo anterior, em métodos para achar a saída do controlador Fuzzy que irá ser aplicado ao sistema. Porém, existem diferentes métodos, dos quais alguns serão apresentados nesse trabalho (Simões & Shaw, 2001).

- Centro de massa: Essa técnica também pode ser conhecida como centro de gravidade ou centroide. Não é muito utilizada por conter integrais na sua formulação, ocasionando uma elevação do custo computacional. Contém alguns problemas gerados pela sobreposição das funções pertinências e singularidades das regras. A Equação 2.3 representa o método descrito:

$$X_G = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x\mu(x)dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu(x)dx} \quad (2.3)$$

$\mu(x)$ é o elemento no universo de discurso que a função de pertinência tem no momento x ;

x é o momento que o sistema se encontra.

- Média dos máximos: Diferente do Centro de Massa, esse tipo de Decodificação não contém integrais, conseqüentemente, tem um menor custo computacional. Porém, mesmo assim não é muito utilizado devido ao seu resultado ser em valores discretos, descontínuos, como na equação 2.4:

$$X_{MM} = \frac{\sum_{i=1}^M x_{max}(i)}{M} \quad (2.4)$$

Onde:

x_{max} é o elemento no universo de discurso que a função de pertinência tem um máximo;

M é o número total desses elementos.

- Centro dos Máximos: Essa técnica é bastante aplicada devido a sua fácil implementação e aos seus bons resultados gerados, exposta na equação 2.5:

$$X_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^M X_{max}(i) \mu[X_{max}(i)]}{\sum_{i=1}^M \mu[X_{max}(i)]} \quad (2.5)$$

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão mostrados todos os materiais e métodos utilizados para a realização deste trabalho. Inicialmente, será realizada a modelagem matemática dos tanques, tanto o da Quanser[®] como o do modelo proposto. Posteriormente, serão desenvolvidos os sistemas simulado e real. Os simuladores foram desenvolvidos utilizando o *software* Matlab[®]. Por último, serão abordados os controladores utilizados nesse trabalho.

3.1 Modelagens Dos Tanques

Modelagem de tanques é um assunto difundido dentro da engenharia de controle. Foram modelados dois tipos de tanques, um com o padrão mais usual, com formato cilíndrico e sem alteração da área da secção transversal, e o outro com formato trapezoidal, com variação da área da secção transversal. Ambos seguem padrões similares de modelagem.

Existe a diferenciação da alteração na área da secção transversal. Com isso, é possível observar uma semelhança nos modelos desenvolvidos. Porém, essa alteração gera uma complexidade a mais para o sistema de controle. As semelhanças e diferenças serão mostradas a seguir.

É importante explicar como os sistemas funcionam. Neles contemplam uma bomba que fornece uma vazão para o interior do tanque, essa varia conforme a tensão aplicada nela, podendo aplicar vazões maiores com o aumento de tensão e vazões menores com as suas diminuições. Os tanques contêm dois formatos, o primeiro cilíndrico e o segundo tem formato de trapézio. Em ambos os casos há dois orifícios, um que é a saída para o sensor de pressão e o outro que é o responsável pela vazão de saída do sistema. A seguir na Figura 5, as imagens dos orifícios de entra e saída dos tanques.

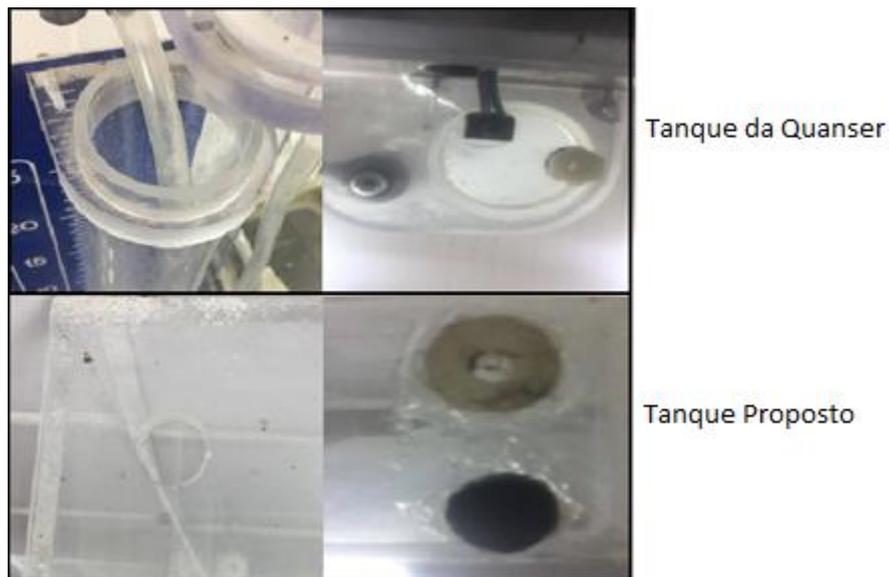


Figura 5: Imagens dos orifícios de entrada e de saída dos tanques

Fonte: Autoria própria

Tendo o conhecimento dos sistemas, a modelagem pode ser desenvolvida. Primeiramente, tem-se a vazão de entrada (F_{in}), que consiste na relação entre a tensão sobre a bomba (V_p) e a constante da bomba (K_m), temos como unidade de vazão de entrada metros cúbico por segundos.

$$F_{in} = K_m * V_p \left[\frac{cm^3}{s} \right] \quad (3.1)$$

Tem-se, também, a saída do líquido pelo orifício do tanque. Para tanto, utilizaram-se as equações de Bernoulli para o escoamento da água:

$$V_{out} = \sqrt{2gL} \left[\frac{cm}{s} \right] \quad (3.2)$$

Onde g é a gravidade e L é a altura do volume de água.

Tendo em vista isso, a vazão ou força de saída do sistema é a relação entre a área do orifício de saída (a), multiplicada pela velocidade de saída do sistema. Dessa forma temos:

$$F_{out} = aV_{out} = a\sqrt{2gL} \left[\frac{cm^3}{s} \right] \quad (3.3)$$

Para obter a variação do nível dos tanques (L), que é a variável de controle que será utilizada no sistema, é necessário, a princípio, definir a variação volumétrica (V') ou a variação de volume no interior do tanque, essa dada pela diferença entre a vazão de entrada e de saída no tanque.

$$F_{in} - F_{out} = Km * Vp - a\sqrt{2gL} \left[\frac{cm^3}{s} \right] \quad (3.4)$$

$$V' = Km * Vp - a\sqrt{2gL} \left[\frac{cm^3}{s} \right] \quad (3.5)$$

Será usado o nível do tanque como variável de controle. Sabendo disso temos que tê-la como variável da equação. Para isso utilizaremos a equação 3.6 para obtê-la. A equação 3.6 mostra que o nível do tanque é a variação volumétrica pela área da secção transversal.

$$L = \frac{V'}{A} \quad (3.6)$$

Isolando a variação volumétrica, teremos a equação 3.7:

$$V' = L'A \quad (3.7)$$

Substituindo a equação 3.7 na equação 3.5, teremos:

$$L'A = Km * Vp - a\sqrt{2gL} \left[\frac{cm^3}{s} \right] \quad (3.8)$$

Isolando o nível da equação 3.8, para obter a equação que queremos.

$$L' = \frac{Km}{A} * Vp - \frac{a}{A} \sqrt{2g} \sqrt{L} \left[\frac{cm^3}{s} \right] \quad (3.9)$$

Com isso, é obtida a modelagem do tanque da Quanser®. No tanque da Quanser®, a área da secção continua constante durante todo o processo, no entanto, no tanque proposto há uma alteração conforme a elevação do nível deste. Com isso, a única alteração da modelagem do tanque da Quanser® para o tanque proposto é a área da secção transversal. A equação da alteração da secção transversal do tanque proposto é dada por:

$$A = 50 + 0.833 * Altura \quad (3.10)$$

Essa equação foi retirada pela análise do formato do tanque, visto na Figura 6:

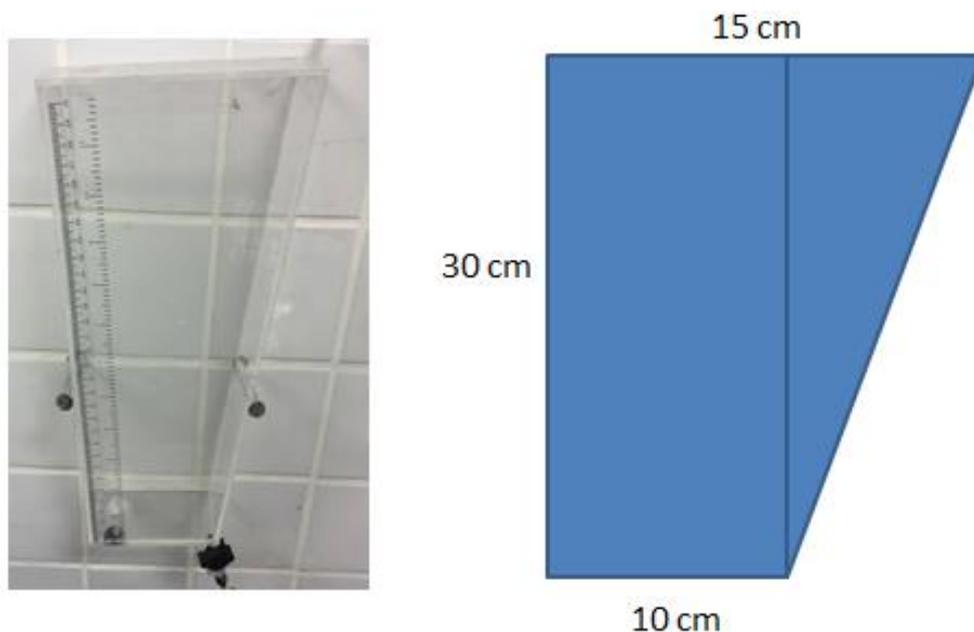


Figura 6: Formato do tanque Proposto.

Fonte: Autoria própria

Como a largura do tanque é de cinco centímetros, o mesmo pode ser dividido em duas partes, sendo a primeira um retângulo e a segunda um triângulo. O retângulo tem comprimento de 10 cm e a largura de 5 cm, gerando 50 cm^2 de secção transversal. A outra área tem o formato de um triângulo. Inicialmente, foi obtido o seu coeficiente angular baseado no ângulo da tangente dos catetos, e com base neste ângulo, foi desenvolvido um fator de crescimento à medida que a altura do tanque se modificava. Esse fator de crescimento é de 0.833 cm^2 por centímetro de crescimento.

3.2 Implementação Do Sistema Simulado E Real

O projeto se divide em dois sistemas. O primeiro consiste no sistema simulado, na qual foram desenvolvidos simuladores para ambos os tanques de acordo com a modelagem. Na segunda parte foram utilizados os tanques reais, com ajuda das interfaces desenvolvidas para poder aplicar o controlador e ler a resposta dos tanques.

3.2.1 Sistema Simulado

Nos sistemas simulados foram desenvolvidos dois simuladores, um para o tanque da Quanser[®] e outro para o tanque proposto. Ambos os simuladores foram desenvolvidos na plataforma Matlab/Simulink[®], sendo os dois regidos pelas

modelagens matemáticas discutidas anteriormente. O simulador do tanque da Quanser® pode ser visto na Figura 7.

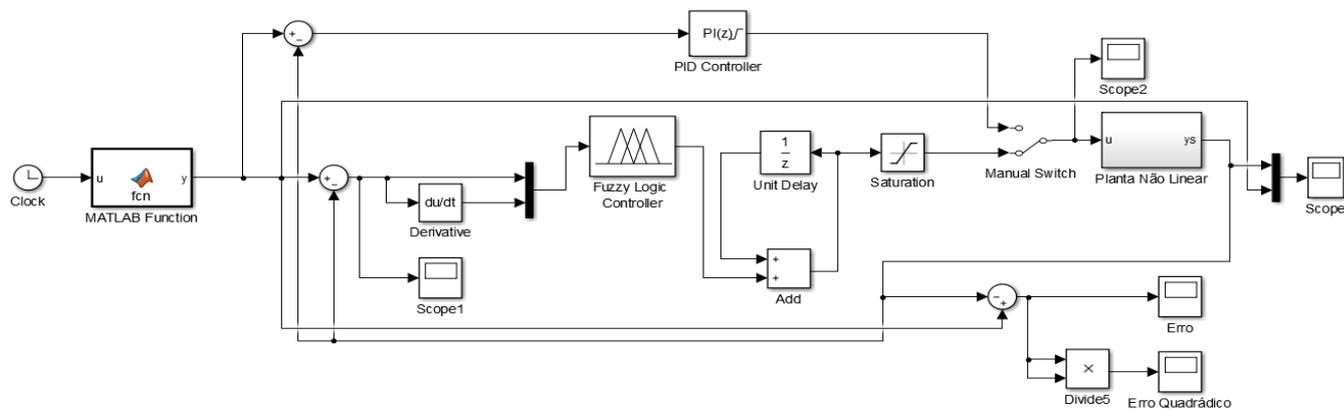


Figura 7: Simulador tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Neste simulador, aplicam-se diferentes valores de referência (*setpoint*), ao longo do tempo, para os controladores Fuzzy e PID, com o objetivo de avaliar qual a melhor saída do sistema. A chave manual é responsável por informar qual controlador será utilizado.

Neste simulador existe um bloco, o qual é responsável pelo comportamento do sistema, que é o bloco Planta Não Linear. Este responde à entrada de tensão aplicada pelo controlador. O seu interior foi expandido, como mostrado na Figura 8, sendo suas variáveis adicionadas posteriormente em um *script*. Algumas dessas variáveis são: altura, gravidade, constante de bomba e área da secção transversal.

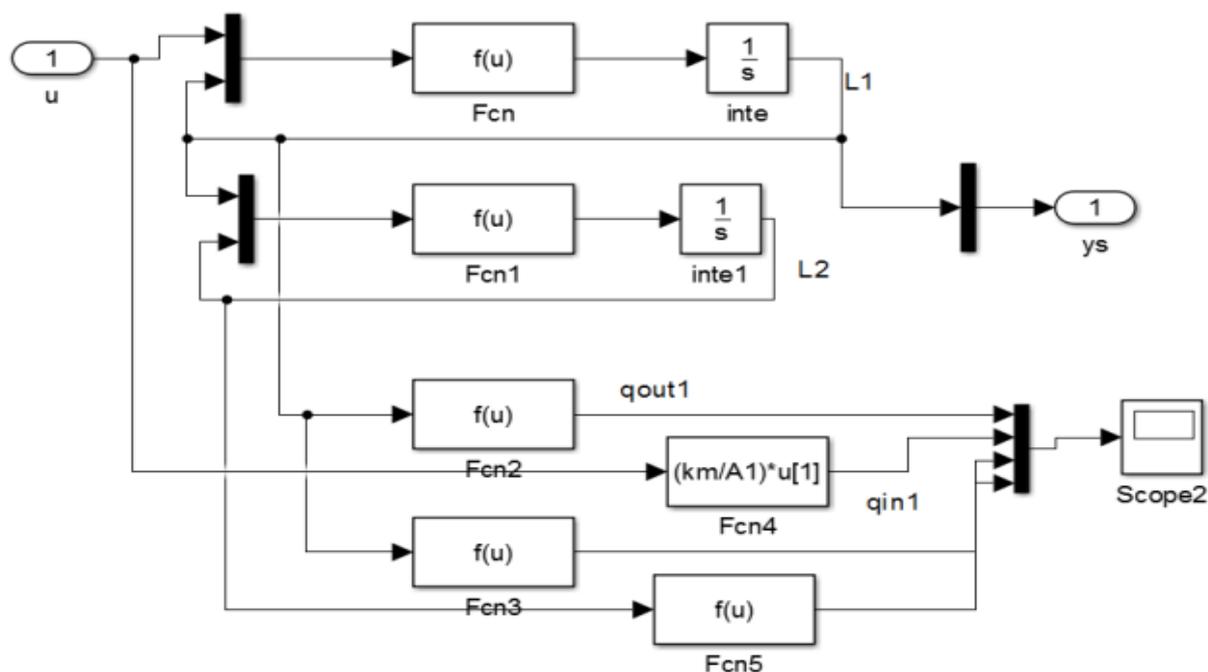


Figura 8: Planta Não Linear.

Fonte: Autoria própria

A Figura 9 representa o simulador desenvolvido para o tanque proposto. Ele foi desenvolvido utilizando o Matlab/Simulink®, com as mesmas equações de estados que estão presentes no modelo passado. A escolha do controlador que será utilizado assim como no modelo passado utiliza-se de uma chave no interior do simulador. Sua alteração principal é conter a equação da modificação da área da secção transversal do tanque conforme o nível se altera diferente do modelo antigo, que é uma constante no local. No seu início tem um bloco MATLAB Funcion 2, esse é responsável pela alteração do *setpoint* do sistema, ele responde a entrada do temporizador que diz quanto tempo devesse se passar em cada *setpoint*. Os blocos *Unit Delay* e *Add1* são os responsáveis por salvar o último valor que foi aplicado na bomba para com a saída do controlador Fuzzy realizar a soma ou a subtração do mesmo. Em seguida temos o bloco *Saturation* é o bloco que limita a tensão saída do controlador Fuzzy, não deixando ultrapassar a tensão limite. É possível ver a existência de alteração na área da secção transversal observando a realimentação dos blocos *Area* no local e *Area* no local1, aonde contém a equação que corresponde o crescimento da área da secção transversal do tanque.

Esse sistema segue o mesmo princípio do anterior, a principal diferença é que com a alteração da altura ocorre uma variação na área da secção transversal, além de ter-se optado, neste caso, por colocar todas as variáveis no mesmo bloco, acarretando um simulador menos compacto, porém mais visual.

3.2.2 Sistema Real

O primeiro tanque utilizado foi o do kit didático da Quanser[®] de tanques acoplados, como mostrado na Figura 10. A configuração utilizada nesse trabalho contempla a utilização do tanque inferior. O sensor utilizado tem como propriedade $6,1\text{cm/V}$, e a bomba tem uma vazão de $4,7\text{ cm}^3/\text{V}$. O tanque tem altura de 30 cm e diâmetro de 4,45 cm, e o seu orifício de saída, responsável pela saída da água, tem um diâmetro de 0,48 cm.



Figura 10: Kit didático da Quanser[®].
Fonte: Autoria própria

O tanque proposto tem formato trapezoidal, com o topo de 15 cm de comprimento, base de 10 cm, largura de 5 cm, altura de 30 cm e orifício de saída com 0,48cm de diâmetro. Para esse tanque foi utilizada a bomba do tanque da Quanser[®] e o

sensor MPX5010, que é utilizado para colunas de água de até 1 metro. Na Figura 11 pode ser visto a imagem do tanque trapezoidal proposto.



Figura 11: Tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

Na Figura 12, pode-se observar o sensor utilizado para a medição do nível do tanque. Este foi o MPX5010, devido às suas especificações técnicas, que atendem a condição do tanque, principalmente por ele trabalhar com colunas de água de até um metro, com a tensão de 5 Volts, por ser compatível com o Arduino[®] que será apresentado posteriormente e, principalmente, por fornecer uma boa resolução de 0,0196 V/cm para cada passo do nível do tanque.

A resolução consiste em quanto precisa variar o volume do tanque para ocorrer uma alteração na tensão é na saída analógica do sensor. Pois, se a diferença fosse grande, o controlador não conseguiria atuar corretamente, já que o controlador iria trabalhar como se o tanque estivesse em uma região, quando, na verdade, o tanque real estaria em outra, gerando um erro na saída do controlador e impossibilitando o seu controle.



Figura 12: Sensor MPX5010.
Fonte: Autoria própria

Para fazer a comunicação entre os periféricos e o Matlab[®], foi utilizado um Arduino[®] Uno. Sua vantagem é a fácil interação do *hardware* e do *firmware*. A Figura 13 exibe a foto do Arduino[®] utilizado.



Figura 13: Arduino Uno[®].
Fonte: <https://www.arduino.cc/> (2016)

O Arduino Uno[®] contém 14 entradas e saídas digitais (6 dessas saídas podem ser usadas como saídas PWM), 6 entradas analógicas, 1 porta serial de *hardware*, pinos de alimentação de 5 V, 3,3 V e Terra (GND), um oscilador de cristal de 16 MHz, conexão

USB – *Universal Serial Bus*, entrada de alimentação externa através do conector *jack* de 7 V à 12 V, botão *reset* e microcontrolador ATmega328P (Atmel).

Para programar, o Arduino® utiliza-se de um ambiente de desenvolvimento integrado ao *hardware* (IDE – *Integrated Development Environment*). O IDE do Arduino foi escrito em JAVA e é compatível nas plataformas Windows e Linux; sua linguagem de programação é baseada em C/C++ e é chamada *wiring* (MCROBERTS, 2011).

Juntamente ao Arduino®, foi utilizada uma placa para fazer a comunicação *wireless*, utilizando o Wi-fi como meio de comunicação entre o Arduino® e o computador que está compilando o controlador. Com esse sistema é possível fazer a comunicação dos periféricos sem a necessidade da comunicação física entre os mesmos, desde que ambos estejam em uma rede Wifi própria para essa função, e, ainda, executando um *script* de conexão, sua principal função é ser uma placa de transmissão de dados, aonde sua utilização foi principalmente devido a fácil integração com a instrumentação utilizada no processo, sua facilidade no processo de programação e seu fácil acesso. Na Figura 14 esta o *hardware* em questão.

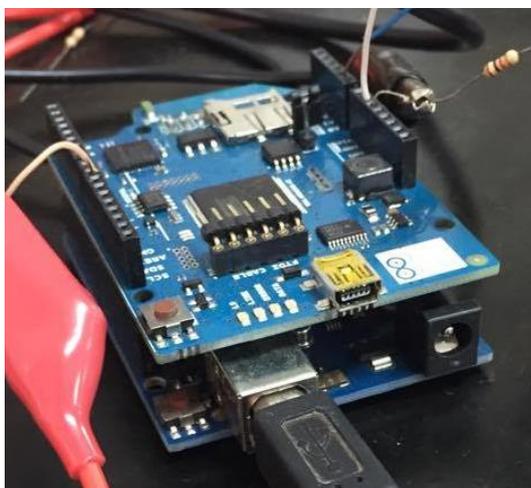


Figura 14: Sistema utilizado.

Fonte: Autoria própria

A Figura 15 mostra o drive utilizado para controlar a bomba da Quanser®. Uma das suas funções é receber um sinal analógico, ou o sinal PWM, e convertê-lo em um valor de tensão que será aplicado na bomba, existindo a opção de transferir o mesmo valor de tensão recebido ou amplificar o sinal em três vezes mais.

A tensão nominal da bomba é de 15 volts. No caso desse trabalho, como a tensão de controle que sai do Arduino[®] é de apenas 5 volts, foi necessária a utilização do amplificador no sistema. Esse drive também é responsável pela leitura do sensor utilizado para os tanques da Quanser[®].



Figura 15: Drive Quanser[®]
Fonte: Autoria própria

3.3 Controladores

Para esse trabalho foram selecionados os controladores PI e o Fuzzy. O PI foi o controlador clássico selecionado, devido a ser utilizado nos parques indústrias e contém uma gama de aplicação vasta, foi utilizado o controlador PI e não o controlador PID devido a com o nível de ruído que o sistema real contém o sistema se comporta melhor retirado a parte derivativa do controlador. Já o Fuzzy foi selecionado devido a conseguir englobar as não linearidades do sistema dentro do controlador.

3.3.1 PI

O controlador PI foi utilizado neste trabalho pois para esse sistema não se fez necessário a utilização da parte derivativa do controlador. O objetivo é ajustar a tensão que será aplicada na bomba. O sistema tem um sinal limitado de tensão que só pode ser, no máximo, de 15 volts. Para o projeto do controlador PI, deve-se ajustar o K_p e K_i , o que foi feito por uma análise das curvas das respostas, com os ajustes dos ganhos utilizando a ferramenta do Matlab *PID tuner* e, posteriormente, com o ajuste manual, para a obtenção da melhor resposta possível.

Com esse processo, foram obtidos os valores de K_p e K_i diferentes para cada tanque. Inicialmente, para o tanque da Quanser[®], foi obtido um valor K_p de 1.82 e K_i de 0.032. Posteriormente, para o tanque proposto foram obtidos os valores K_p de 1.5 e K_i de 0.05.

3.3.2 Fuzzy

Na Figura 16, tem-se um diagrama de bloco do sistema de controle de nível Fuzzy em malha fechada.

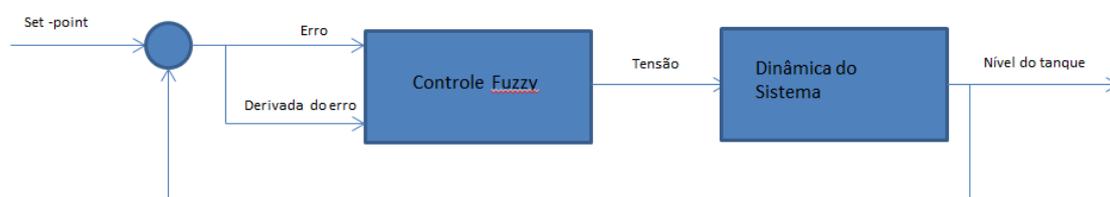


Figura 16: Malha de controle para controle Fuzzy.

Fonte: A autoria própria

As funções de pertinência que irão ser descritas retratam o comportamento dos sistemas conforme as variáveis de controle estipuladas. O erro aceitável foi definido como menor que 5% do valor de *set-point*.

A variável de entrada do erro contém cinco conjuntos Fuzzy. Entre uma amplitude de atuação de $[-30 \ 30]$, eles foram divididos em Erro Negativo Grande (ENG), Erro Negativo Pequeno (ENP), Erro Zero (EZ), Erro Positivo Pequeno (EPP) e Erro Positivo Grande (EPG), conforme o exposto na Figura 17. O limite de amplitude consiste de -30 a 30 devido ao sistema poder começar cheio e o *setpoint* ser 0 ou 1, gerando uma diferença entre o erro e o *setpoint* negativa, outra situação é ele começar vazio e o *setpoint* ser 30 que consiste na forma de teste mais utilizado, que gera uma diferença entre o erro e o *setpoint* positiva.

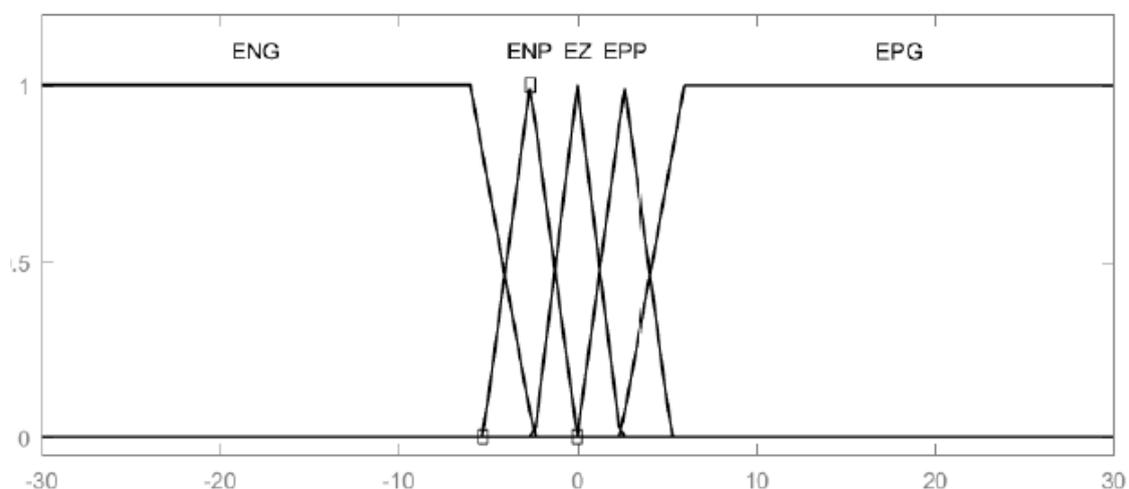


Figura 17: Funções de pertinência da variável erro.
Fonte: Autoria própria

A outra variável de entrada (derivada do erro), assim como o próprio erro, contém cinco conjuntos Fuzzy, embora tenha uma amplitude de atuação de $[-0.3 \ 0.3]$. Foi dividida em Derivada Erro Negativo Grande (DENG), Derivada Erro Negativo Pequeno (DENP), Derivada Erro Zero (DEZ), Derivada Erro Positivo Pequeno (DEPP) e Derivada Erro Positivo Grande (DEPG), conforme mostrada na Figura 18. Essa pequena amplitude é devido essa entrada só mensurar a tendência de crescimento ou decaimento do sistema, com isso a amplitude de -0.3 a 0.3 é o suficiente.

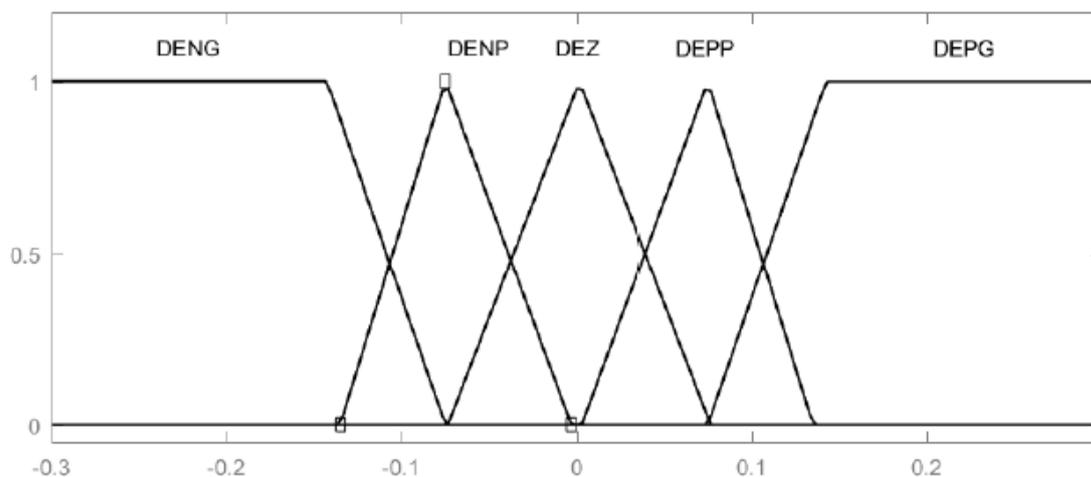


Figura 18: Funções de pertinência das variáveis derivada do erro.
Fonte: Autoria própria

O controlador tem como ação aumentar ou diminuir o valor de tensão que está sendo aplicado na bomba. A saída do controlador é um valor que será somado com o valor aplicado na bomba anteriormente, tornando o controlador inercial. Seu *range* de

aplicação é $[-0.1 \ 0.1]$. Os conjuntos Fuzzy foram definidos em 5: Bastante Diminuição (--), Diminuição (-), Estável (0), Adição(+), Bastante Adição(++). Conforme apresentado na Figura 19. A amplitude neste caso foi obtida através de testes realizados no sistema, aonde com o aumento da amplitude gera oscilação que dependendo do aumento pode gerar instabilidade no sistema, é com sua diminuição o controlador trabalha muito lentamente, demorando o processo de estabilização do sistema.

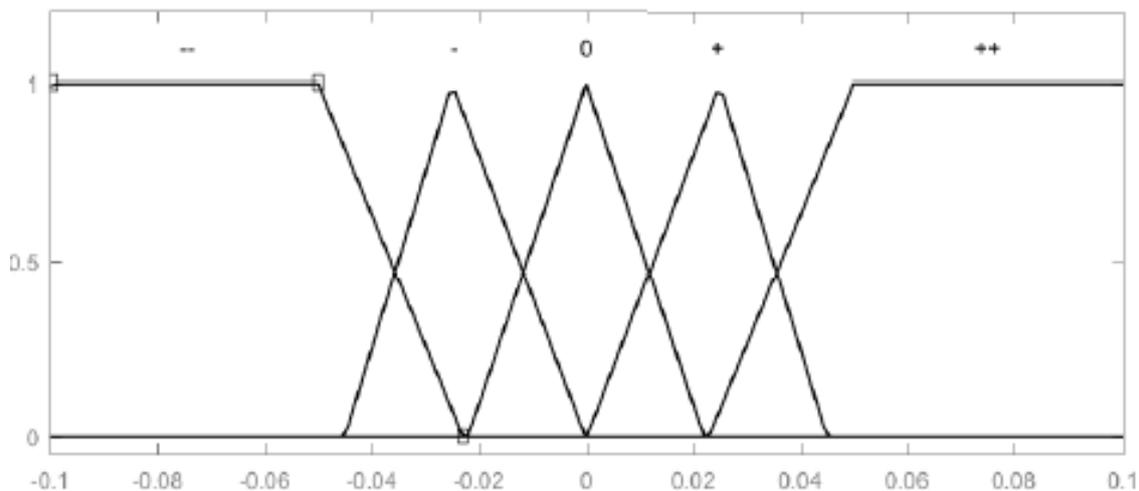


Figura 19: Funções de pertinência das variáveis saída.
Fonte: Autoria própria

Para cada combinação entre o erro e a derivada do erro, existe uma saída diferente, criando uma matriz FAM de saídas. Com isso, para cada saída ocorrerá uma variação do peso, dependendo das interseções e uniões dadas pelas variáveis. A Tabela 1 mostra as regras para a tomada de decisão do controlador.

Tabela 1: Regras para tomada de decisão.

	ENG	ENP	EZ	EPP	EPG
DEPG	0	++	+	0	+
DEPP	++	0	+	0	+
DEZ	--	--	0	+	+
DENP	--	-	-	+	+
DENG	--	--	--	+	+

Fonte: Autoria própria

As regras foram obtidas através do conhecimento sobre o funcionamento do sistema e das análises que foram realizadas do controlador Fuzzy.

O controlador Fuzzy para esse projeto trabalha de formar acrescentar ou diminuir a tensão que estão sendo aplicado na bomba, que pode ser no máximo 0.1 de acréscimo ou de subtração. Essa configura foi adotada devido ao controlador Fuzzy trabalhando dessa forma ele ganha adaptabilidade ao sistema no qual ele esta realizando o controle, podendo alterar o sistema que o controlador esta imerso, é o mesmo continua com trabalhando com eficiência.

3.3.3 Critérios de Análise

Para poder avaliar o funcionamento dos controladores, é importante definir quais aspectos serão avaliados, tanto no aspecto do controlador, como na resposta do sistema.

Inicialmente para os controladores, será avaliado, principalmente, o tempo de estabilização, que consiste no tempo necessário para que a resposta entre e permaneça dentro de uma faixa percentual (2% ou 5%) em torno do valor de regime permanente. O outro ponto que será avaliado é o sobressinal (*overshoot*), que consiste na diferença entre o valor máximo de pico atingido e o valor final do sistema.

Posteriormente para o sistema, será avaliado o erro na saída do sistema, o que será a diferença entre o valor de *setpoint* e o valor de nível no qual o tanque se encontra. Será utilizada a técnica do erro quadrático para uma melhor precisão do sistema, podendo com essa técnica obter valores de até o quadrado do erro, com isso, aumentando a amplitude do erro possível. Outro ponto é o valor de tensão que será aplicado na bomba, podendo-se, com isso, avaliar a velocidade de resposta do controlador.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

Neste capítulo serão analisados os resultados obtidos nos experimentos. Para fazer uma melhor análise da resposta, primeiramente, será utilizado um conjunto de pontos próximos da região de 15 cm de nível dos tanques e, posteriormente, outro conjunto de pontos distribuídos em todo o intervalo do tanque. Esses dois conjuntos de *setpoints* serão aplicados tanto para o tanque da Quanser[®], como para o tanque proposto. Repetindo-os nas simulações e nos testes práticos, para se obter os sistemas expostos às mesmas condições. Devido à exposição dos sistemas aos mesmos *setpoints* e tempo, será possível fazer uma comparação com maior nível de precisão para os sistemas.

4.1 Resultados Referentes Às Simulações

Foi aplicado, inicialmente, em ambos os controladores, o conjunto de pontos de operação próximo a 15 cm de nível. Essa escolha foi realizada devido à proximidade dos pontos, à menor exigência dos controladores. Para podermos ter um resultado mais completo, foi aplicado um conjunto de *setpoints* mais distribuídos pelo tanque, podendo verificar o funcionamento do controlador para todas as regiões deste.

Para analisar os dados, foram gerados gráficos de convergência, com o intuito de visualizar a resposta dos controladores. O gráfico da tensão de saída também foi analisado, para poder observar o quanto de tensão foi aplicada sobre a bomba, pois como isso podemos analisar o comportamento do controlador, podendo, assim, prevenir problemas futuros e analisar o seu comportamento. Outro parâmetro para analisar os erros gerados pelo sistema é o erro quadrático.

4.1.1 Tanque da Quanser[®]

Nessa primeira parte das análises, será dado foco ao tanque da Quanser[®]. Na Figura 20 tem-se a resposta do controlador PI para as regiões próximas a 15 cm. Pode-se observar que o controlador teve uma boa resposta, praticamente sem *overshoot* e com tempo de estabilização baixo, exceto no primeiro degrau, onde o sistema parte da condição inicial zero, ou seja, tanque vazio.

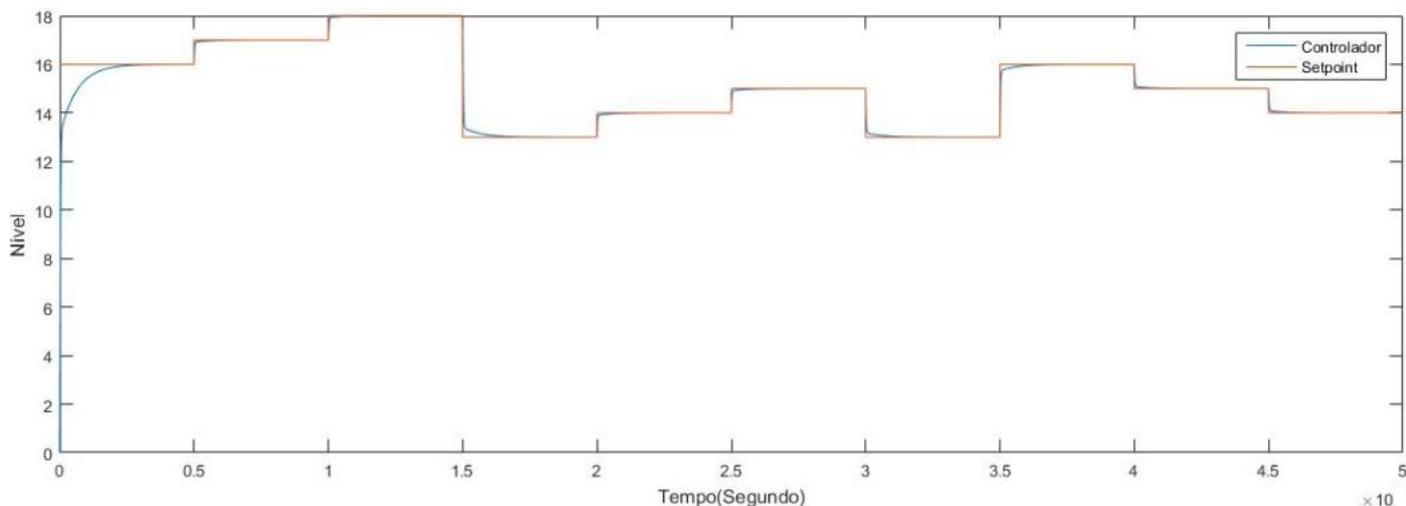


Figura 20: Saída do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 21, podemos ver que o controlador PI obteve uma boa velocidade de resposta, utilizando picos de tensão nos primeiros segundos de cada degrau dos *setpoints*. Nesse caso, o controlador PI foi sintonizado dando prioridade ao tempo de acomodação, ou seja, o PI sintonizado tem característica agressiva, com isso elevações bruscas de tensões são aplicadas para que o sistema responda de forma mais rápida. O mesmo comportamento pode ser visto quando as variações dos *setpoints* são negativas, onde o PI apresenta quedas de tensão bruscas.

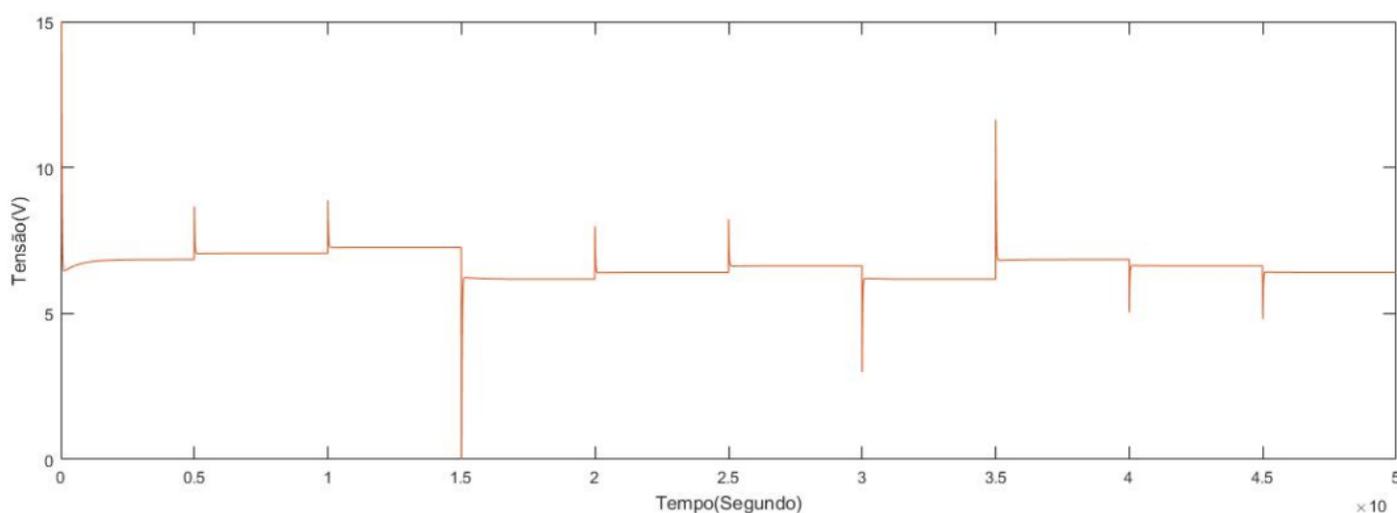


Figura 21: Saída de tensão do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Pode-se perceber, ainda melhor, a eficiência do controlador pelo gráfico de erro quadrático mostrado na Figura 22. Isso devido a ter pequenos intervalos com erro no sistema e, com isso, mostrar a eficiência do controlador, que, além de responder rapidamente às mudanças do *setpoint*, existe também uma convergência muito rápida, na qual o gráfico permanece a maior parte do tempo no erro zero.

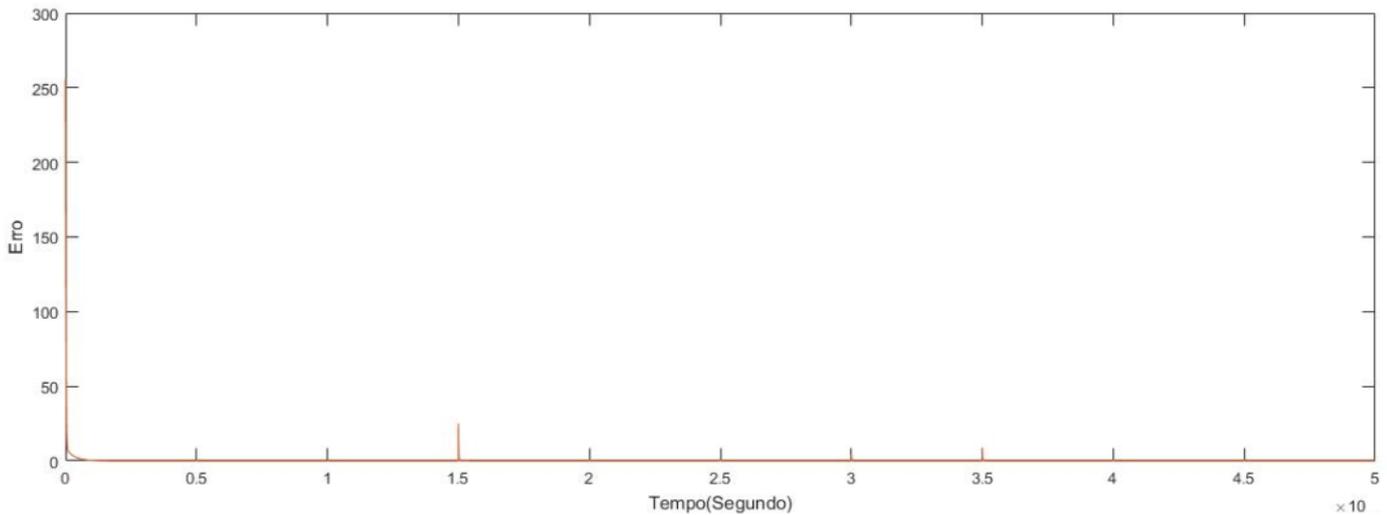


Figura 22: Erro Quadrático do controlador PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.
Fonte: Autoria própria

O controlador Fuzzy foi dimensionado para que sua saída não seja a saída que irá ser aplicada no sistema, mas para um valor a ser incrementado ou decrementado da tensão que está sendo aplicada. A escolha dessa saída para o controlador Fuzzy teve como propósito diminuir oscilações e dar maior estabilidade ao sistema. Assim, acaba ocorrendo um pequeno *overshoot* para o primeiro *setpoint*, devido à diferença entre os valores inicial e final ser grande. A mesma coisa acontece com o decaimento do *setpoint*. Ele vai diminuindo lentamente e acaba gerando uma saída mais lenta, como podemos observar na Figura 23. Essa saída mais lenta é devido a sintonia que foi realizada para esse Fuzzy, entretanto pode-se colocar mais agressividade no controlador, fazendo com que o mesmo tenha uma resposta mais rápida, essas modificações podem ser adicionadas na matriz de associação Fuzzy ou nas funções de pertinência.

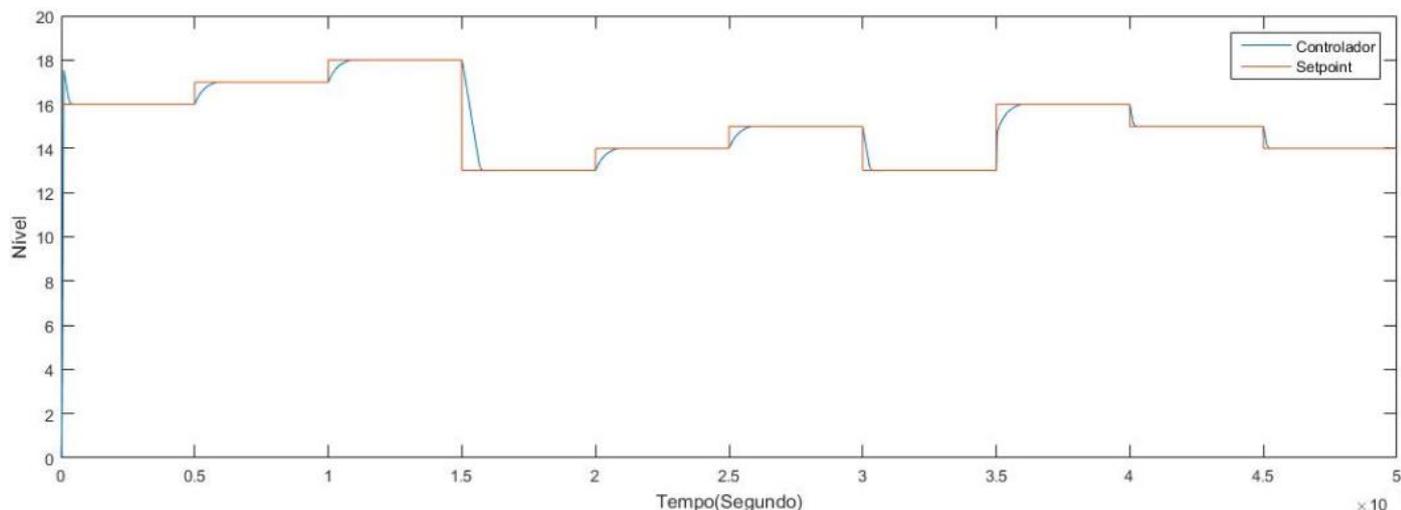


Figura 23: Saída do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.
Fonte: Autoria própria

Em relação ao sinal de controle, pode-se observar que o Fuzzy é mais suave, devido a trabalhar com acréscimo e decréscimo da tensão que será aplicada na bomba, acaba ocorrendo uma alteração mais lenta da mesma, tendo um pico de tensão apenas em momentos iniciais, melhorando na parte prática, diminuindo possíveis danos aos equipamentos e ruídos gerados pelos motores. Essa opção de forma de trabalhar do controlador Fuzzy foi selecionado devido a conseguir se adaptar melhor as alterações que o sistema pode vir a gerar, alterações essas que pode ser geradas devido a ruído dos sensores, não linearidades do sistema, alteração do formato do tanque, entre outros fatos. O controlador, devido à sua configuração, não necessita ter picos de tensão, diferente do controlador PI. Pode-se observar isso na Figura 24.

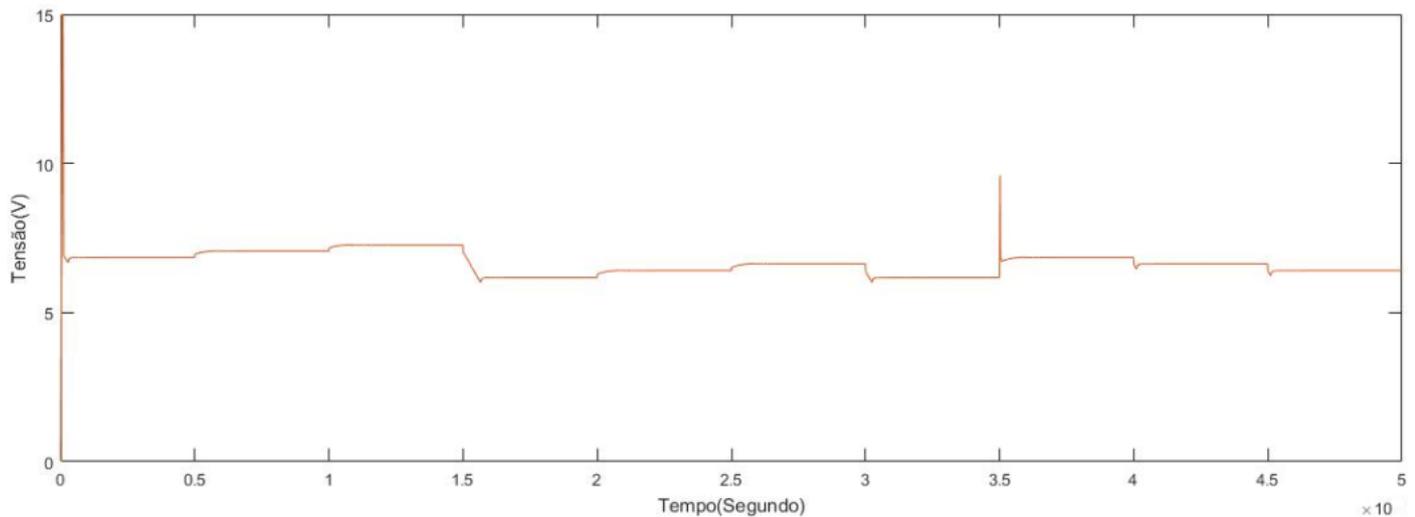


Figura 24: Saída de tensão do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

É possível observar que, assim como no controlador PI, o controlador Fuzzy apresenta erros pequenos. Quando há uma diminuição no *setpoint*, isso devido ao controlador Fuzzy trabalhar reduzindo a tensão aplicada na bomba, essa redução ocorre de forma mais lenta devido a matriz de associação Fuzzy desenvolvida, com isso, acaba gerando uma saída mais lenta do controlador, acarretando um déficit em comparação ao controlador PI, como é visto na Figura 25.

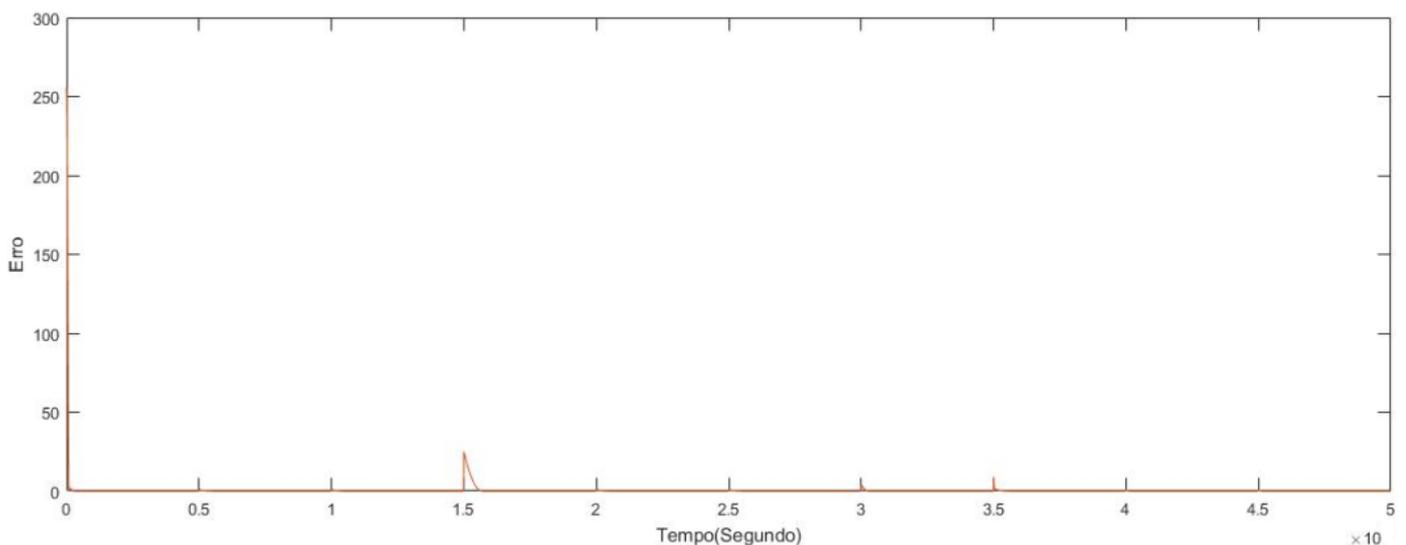


Figura 25: Erro Quadrático do controlador Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Concluídas as primeiras análises dos controladores para *setpoints* das regiões próximos a 15 cm, serão aplicados, agora, os mesmos controladores para um conjunto de pontos de operação, distribuídos por todo o tanque.

Inicialmente, o controlador PI obteve uma resposta de rápida convergência para todas as regiões, não obtendo *overshoot* e com os tempos de estabilizações pequenos. Como é visto na Figura 26.

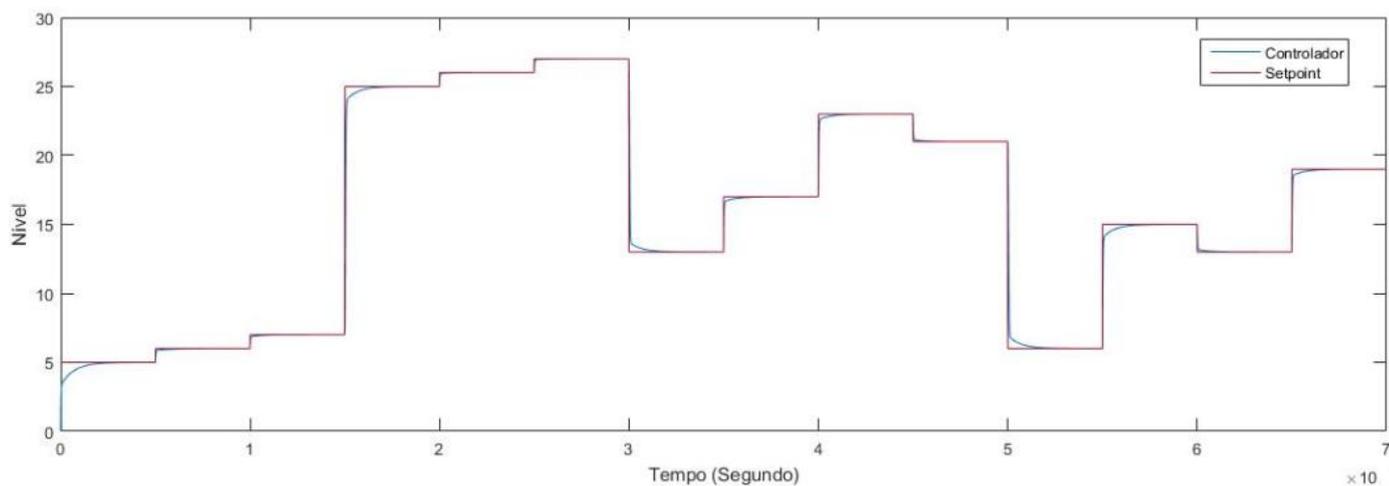


Figura 26:Saída do controlador PI, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Pode-se notar que a velocidade de resposta do controlador se acentua ainda mais quando são aumentadas as diferenças entre as regiões de *setpoint*, chegando mais vezes ao pico máximo de tensão. Como mostrado na Figura 27.

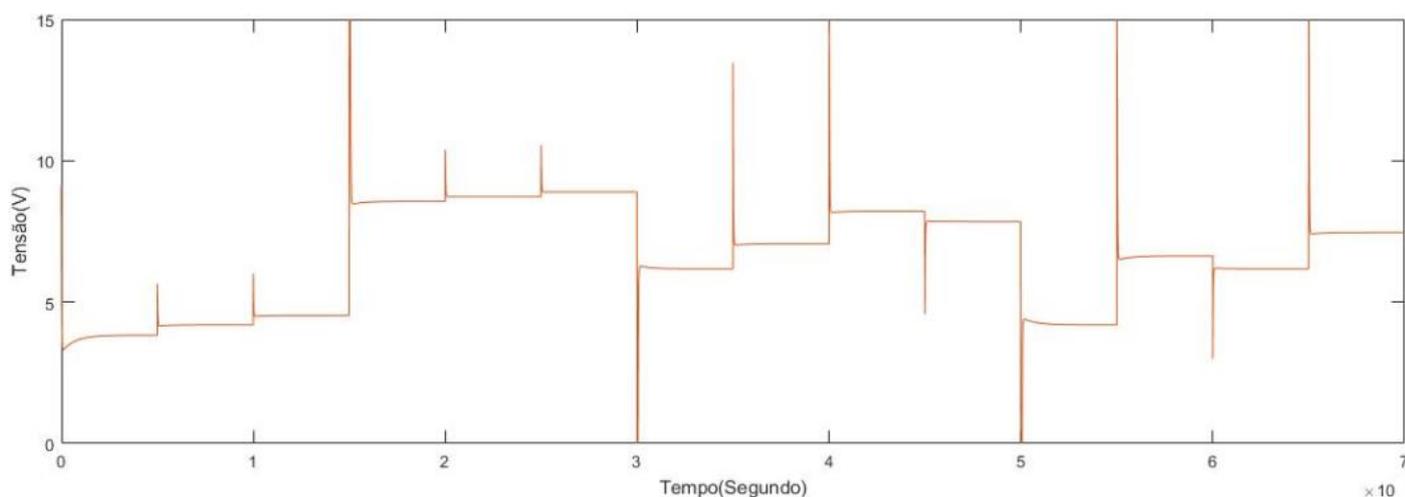


Figura 277:Saída de tensão do controlador PI, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Assim como o erro nas regiões próximas a 15 cm, pode-se avaliar que o controlador teve grande eficiência nas transições de *setpoint*, gerando apenas picos momentâneos, e voltando logo para o erro zero. Como apresentado na Figura 28.

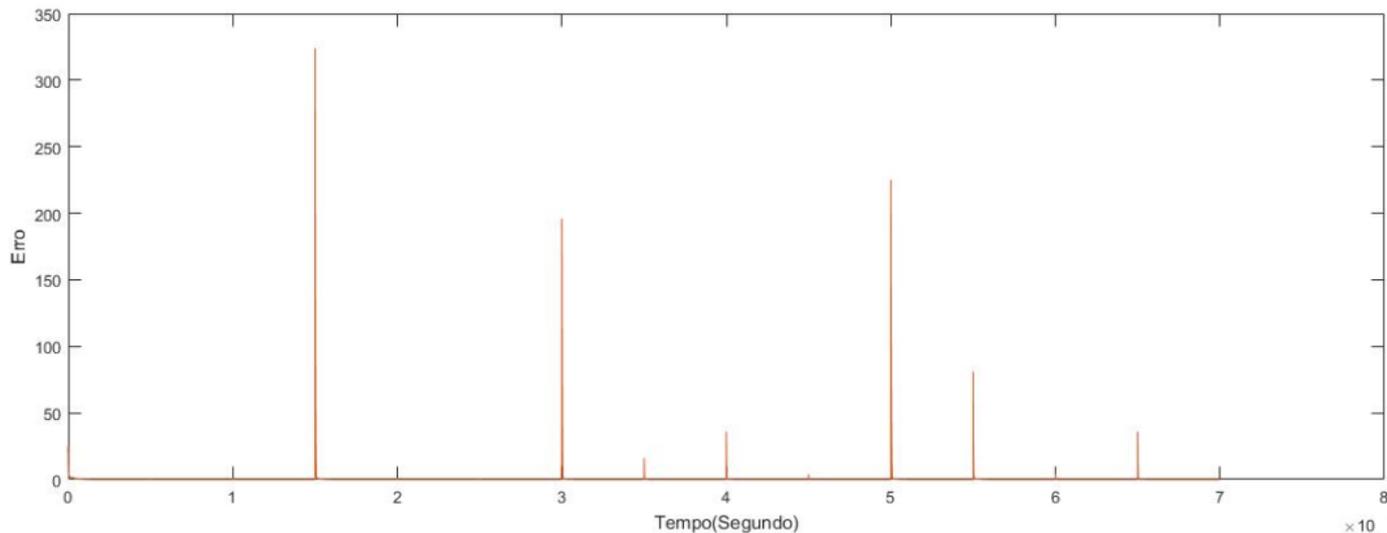


Figura 28:Erro Quadrático do controlador PI, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Como é possível observar, o controlador Fuzzy também obteve boa saída, tendo problema apenas quando tem uma redução grande do *setpoint*, devido às suas características do Fuzzy que foi sintonizado. Obteve apenas um *overshoot* e bons tempos de estabilização. Observa-se na Figura 29.

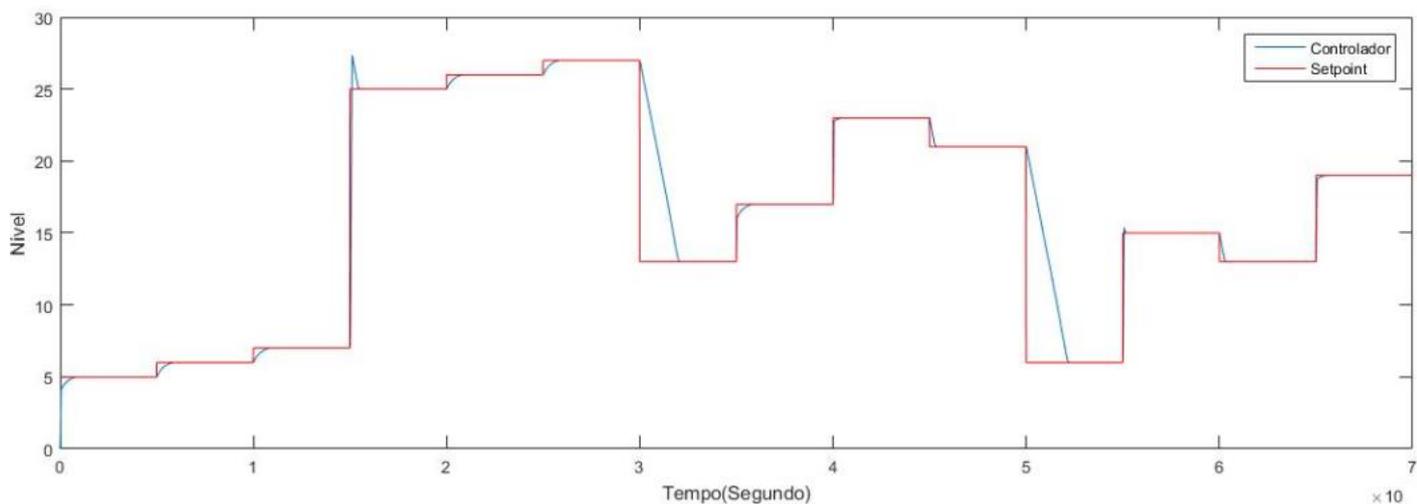


Figura 29:Saída do controlador Fuzzy, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Nesse caso, o controlador se manifestou com uma baixa velocidade de resposta quando todos os *setpoint* estiveram próximos, tendo pequenas alterações na tensão de

estabilização apenas em grandes alterações de *setpoint*. Porém, ainda se mostrou uma velocidade de resposta menor do que o controlador PI, como mostrado na Figura 30.

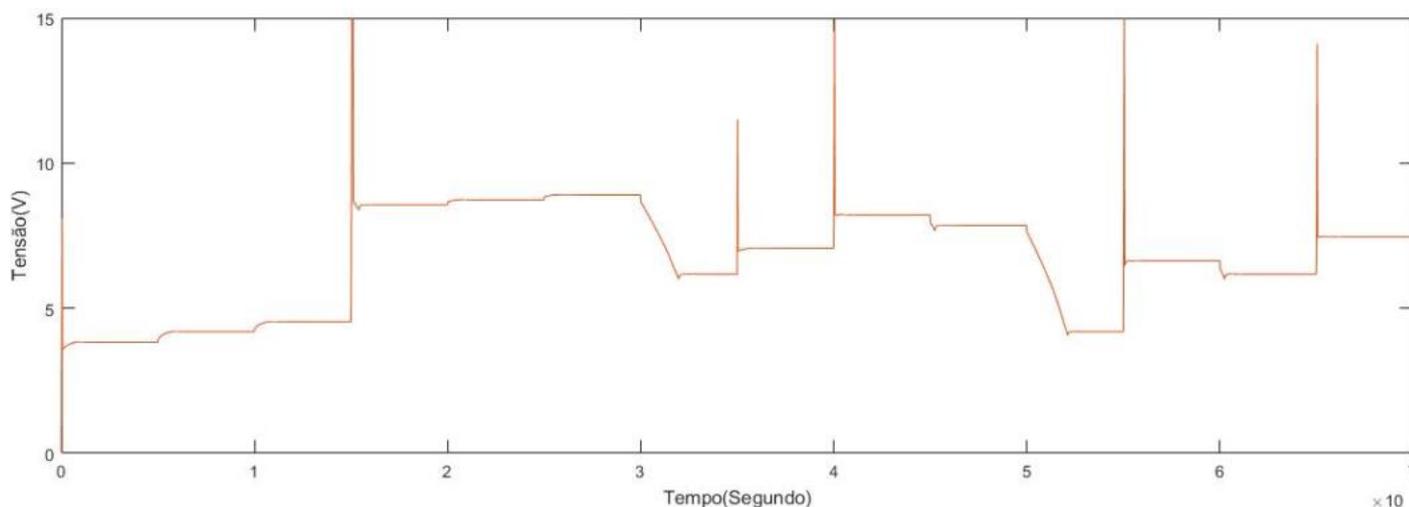


Figura 30: Saída de tensão do controlador Fuzzy, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Proporcional ao outro teste, o controlador Fuzzy apresentou um pequeno erro, apenas um dos pontos de crescimento mais demorado. Porém, isso já era esperado devido à forma como o controlador trabalha. Observa-se na Figura 31.

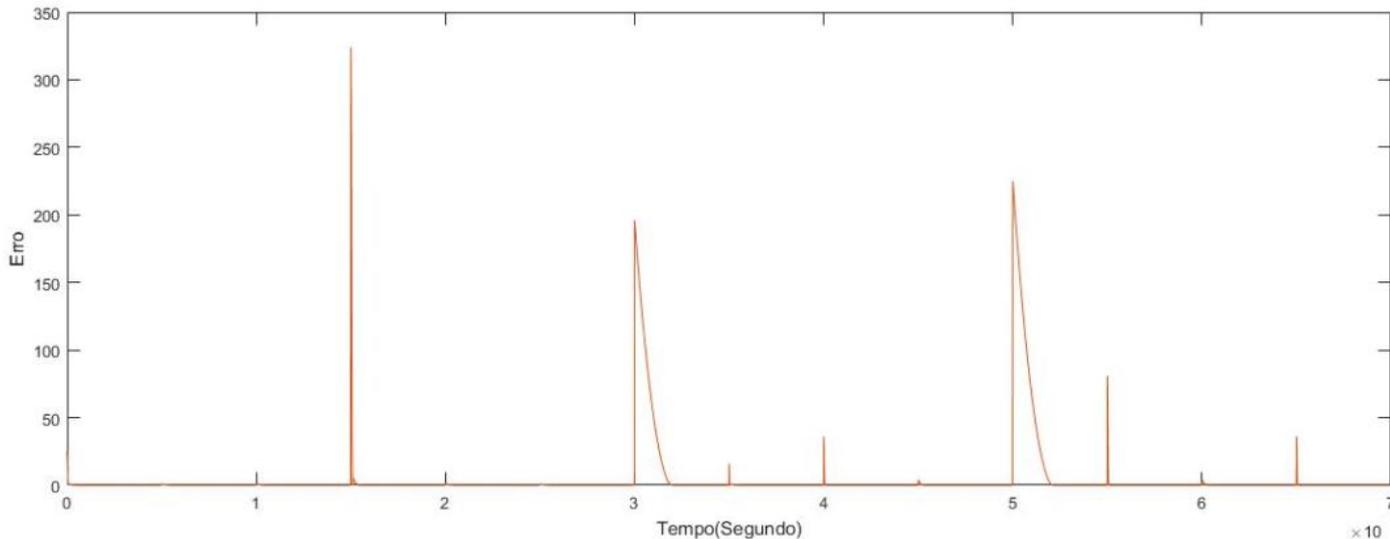


Figura 31: Erro Quadrático do controlador Fuzzy, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Em suma, pode-se observar que os controladores se comportaram de modo semelhante nas duas situações propostas, não havendo uma grande alteração quanto ao comportamento de modo geral. O que aconteceu foi a acentuação de alguns problemas já existentes nos controladores. Essas análises foram feitas para o tanque da Quanser®, na seção 4.1.2 serão analisados os mesmos *setpoints* para o tanque proposto.

4.1.2 Tanque Proposto

Seguindo a mesma sequência, inicia-se com a resposta do controlador PI a *setpoints* próximos a 15 cm. Como é observado na Figura 32.

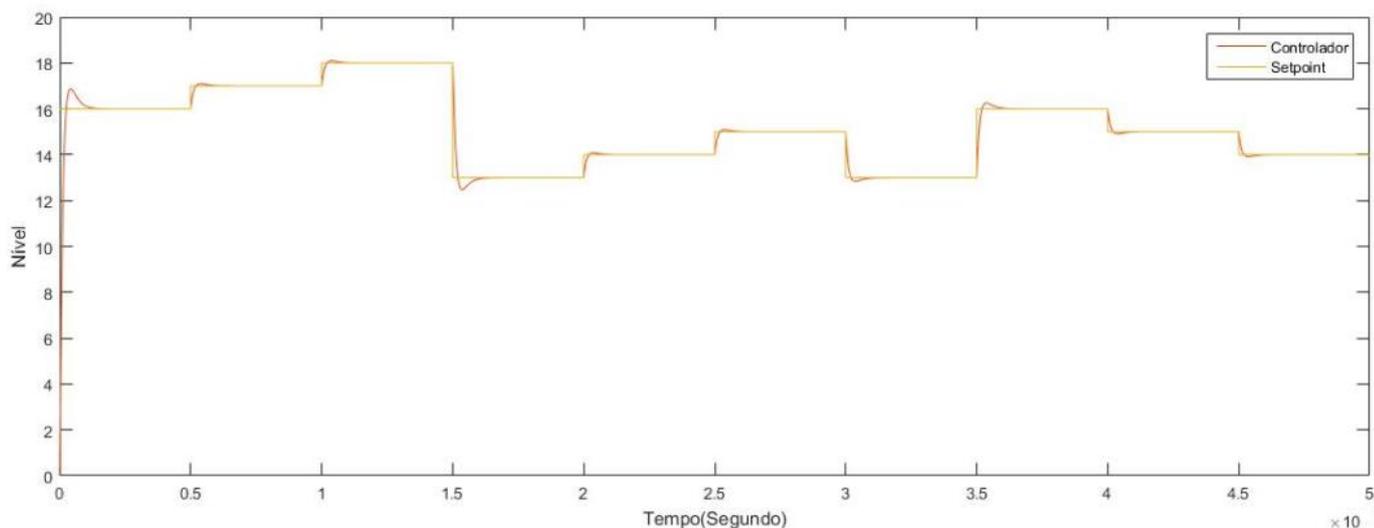


Figura 32: Saída do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.

Fonte: Autoria própria

Pode-se julgar que ocorreram pequenos *overshoots*, em todas as alternâncias de pontos de operação, sendo pequenos os *overshoots* quando comparado ao nível de alteração dos pontos de atuação, que foi de zero para dezesseis, porém tendo um tempo de estabilização rápido. Na Figura 34 o comportamento do controlador em relação à tensão aplicada. Ele se comportou com boa velocidade de resposta, porém, ocorrendo o *overshoots*. Outro motivo também pode ser o formato do tanque, que dificulta a ação dos controladores, pois como a um aumento da secção transversal mediante a elevação do nível, ocorre modificações constantes no modelo matemático do sistema. Como é observado na Figura 33.

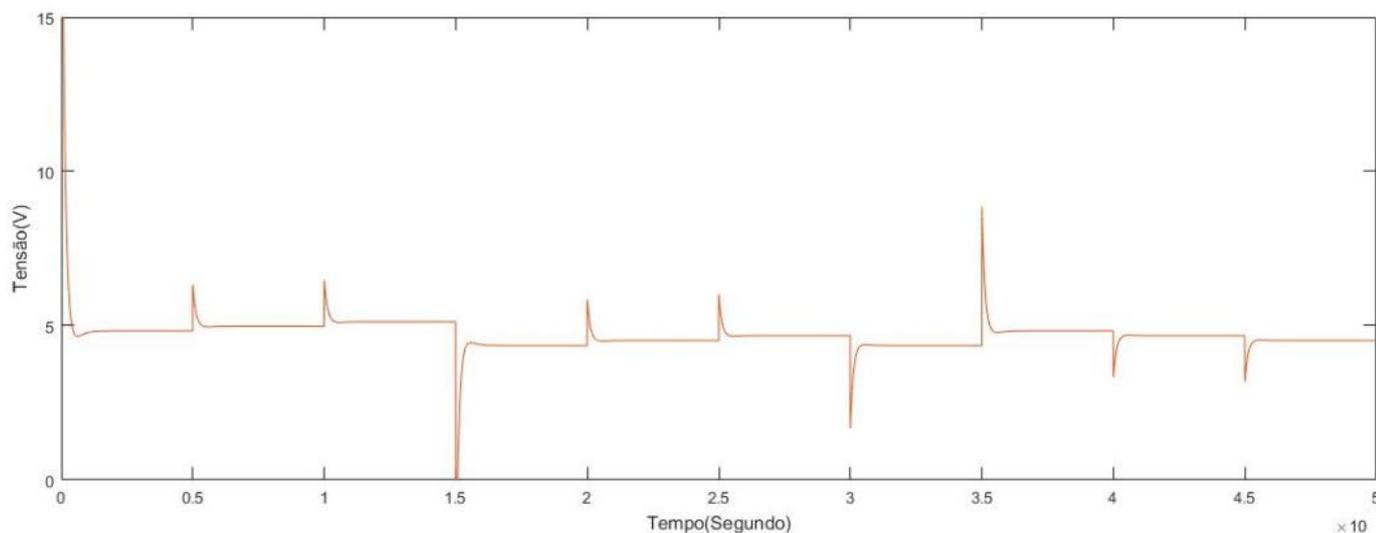


Figura 33: Saída de tensão do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

É observado que, assim como para o tanque da Quanser[®], quando os *setpoint* são muito próximos, o erro apresentou-se pequeno, acontecendo pequenas oscilações apenas quando da troca de ponto de referência. Exposto na Figura 34.

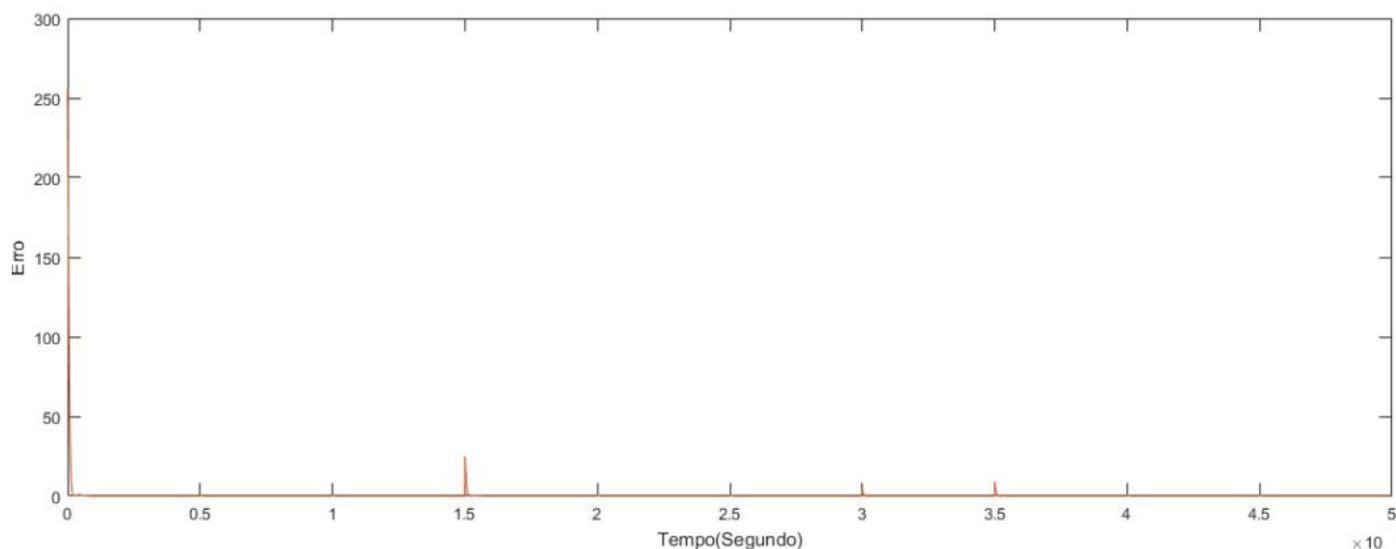


Figura 34: Erro Quadrático do controlador PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

Comparado com o resultado do controlador PI, o controlador Fuzzy teve um resultado melhor, ocorrendo apenas um *overshoot*. Porém, com um tempo de estabilização próximo. Como é observado na Figura 35.

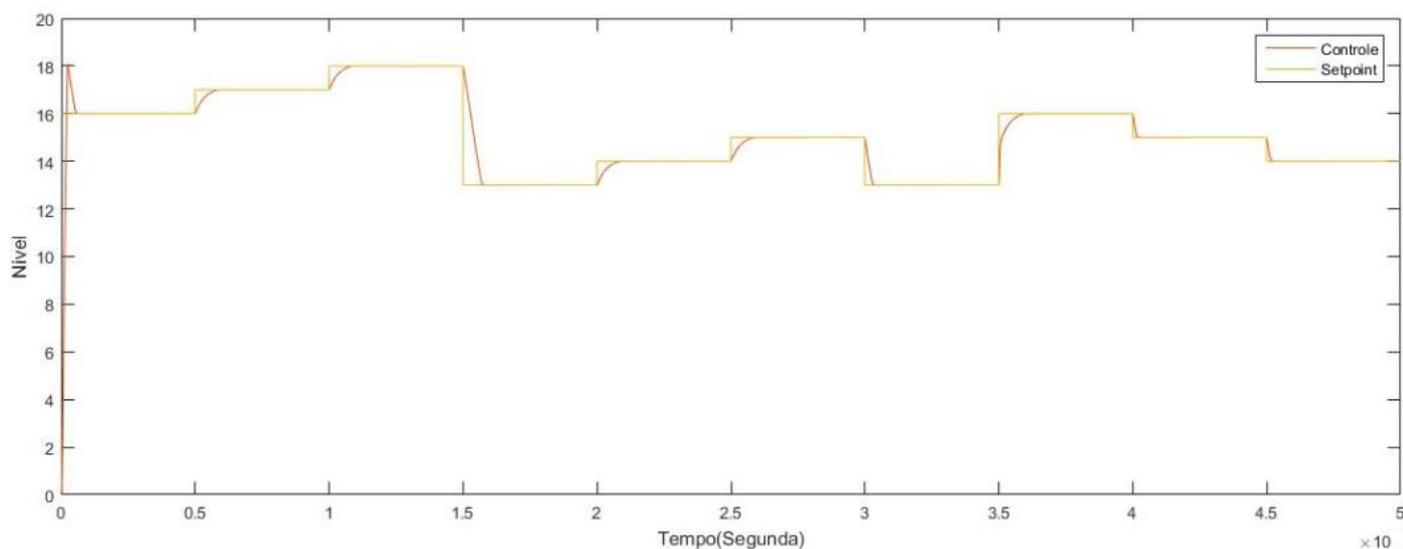


Figura 35: Saída do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

Em questão à tensão de saída do controlador, o Fuzzy teve um sinal de saída mais estável, com poucas oscilações e melhor resultado do que o controlador PI. Podendo ser observado na Figura 36.

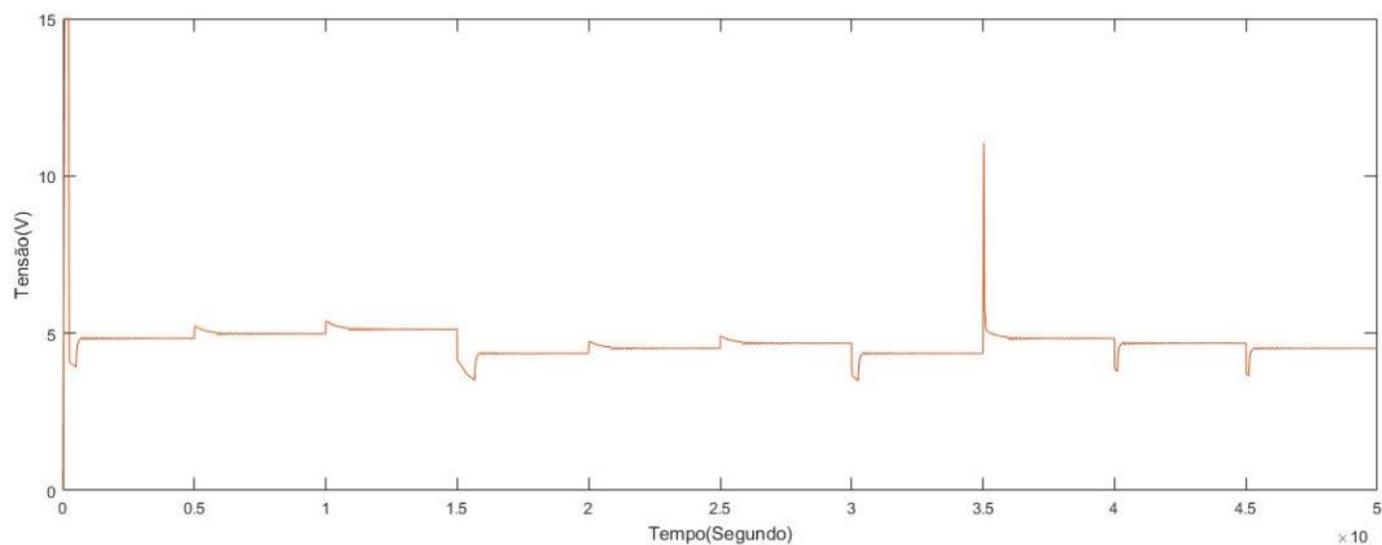


Figura 36: Saída de tensão do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

O gráfico do erro para as regiões próximas a 15 cm, com o uso do controlador Fuzzy, também mostrou semelhanças com o controlador PI, assim como no experimento anterior ensaio passado. Pode-se observar isso, na Figura 37.

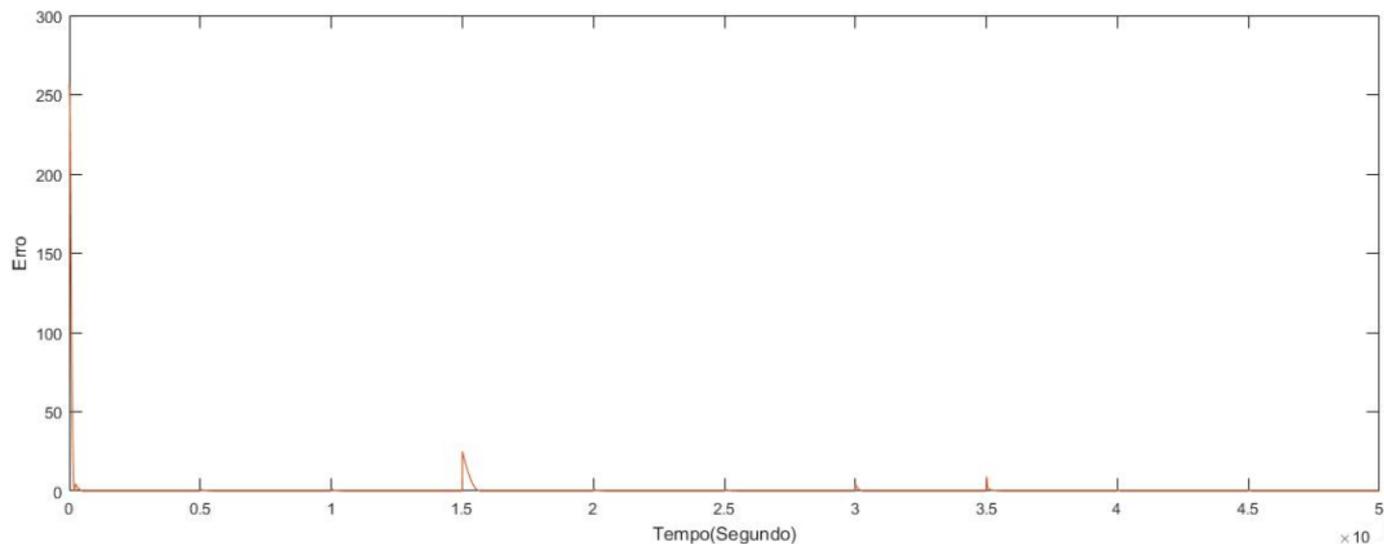


Figura 37: Erro Quadrático do controlador Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

Quando aplicamos o controlador PI para todas as regiões do tanque proposto, podemos ver uma acentuação no seu *overshoot* em regiões de diferenças mais acentuadas, e uma piora no tempo de estabilização gerado por essa maior diferença entre as regiões. Como é observado na Figura 38.

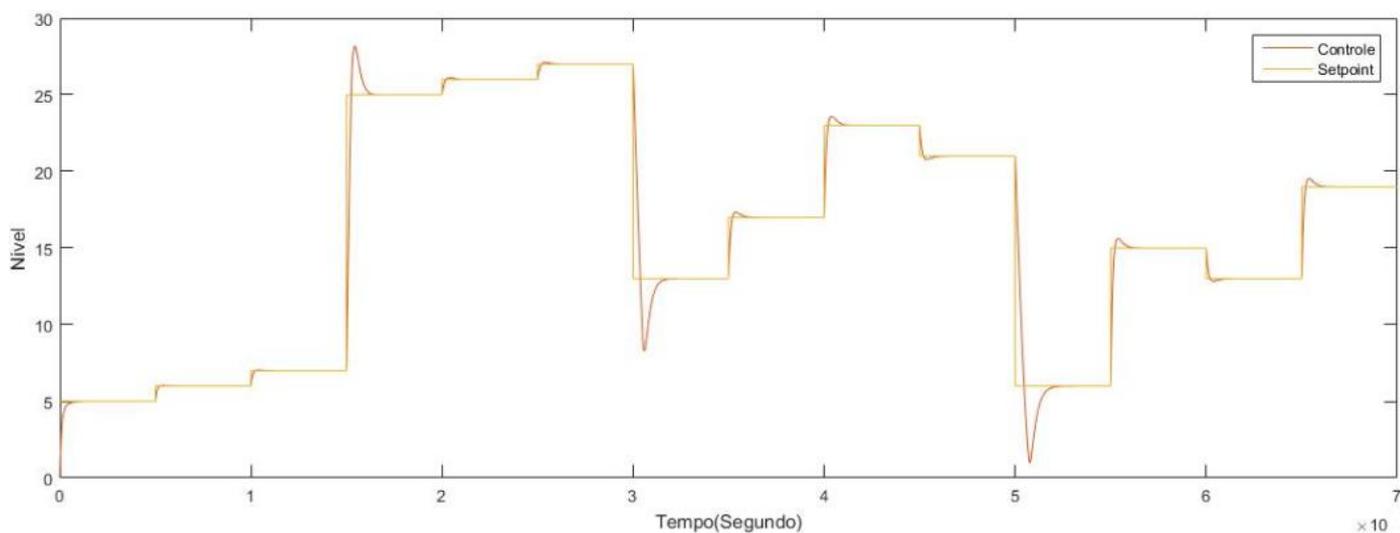


Figura 38: Saída do controlador PI, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

Pode-se observar que o controlador obteve mais regiões máximas e mínimas de tensão aplicada. Isso devido às variações dos *setpoints* serem maiores, e do controlador PI operar com a máxima da tensão aplicada para reduzir o tempo de resposta. Como é observado na Figura 39.

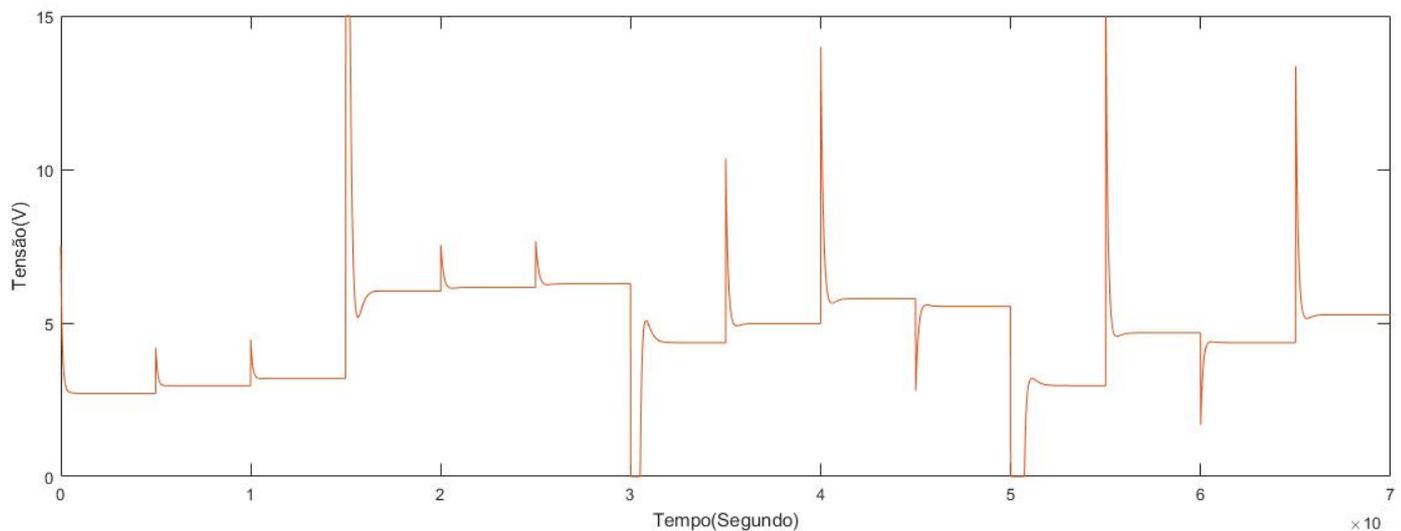


Figura 39: Saída de tensão do controlador PI, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

Já quando ocorrem grandes alterações na localização dos *setpoints*, observa-se que, para esse tanque, o controlador PI não trabalhou muito bem, gerando um maior erro do que o comparado com o tanque da Quanser[®]. Como é observado na Figura 40.

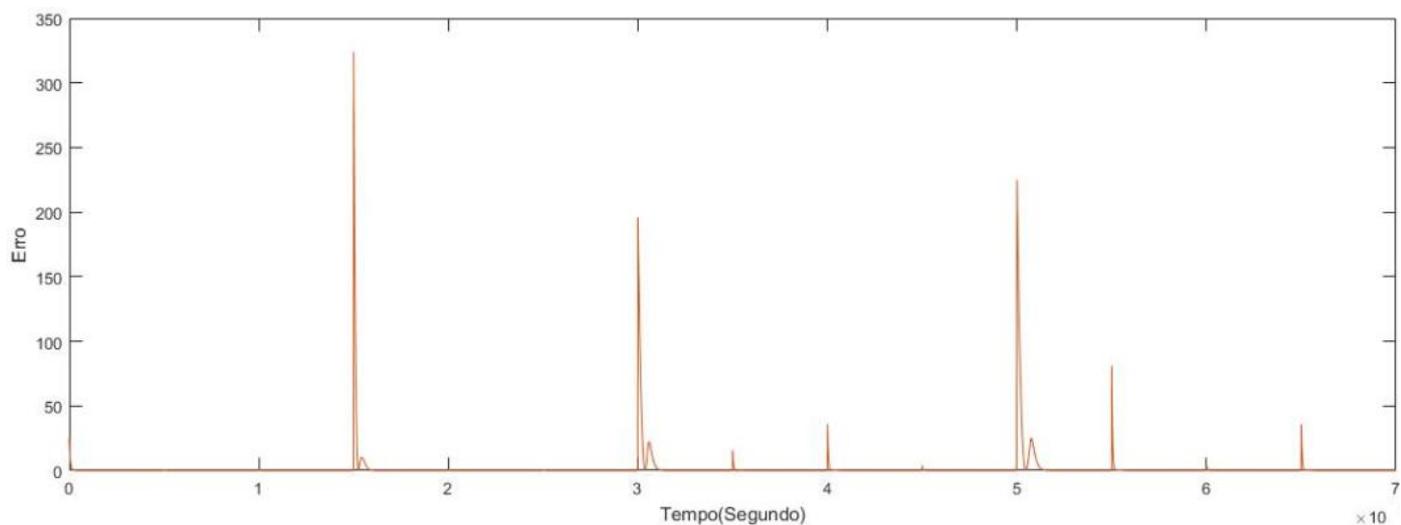


Figura 40: Erro Quadrático do controlador PI para todo o tanque, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

A resposta com controlador Fuzzy teve dois pequenos *overshoots*, é com um tempo de estabilização visualmente melhor que o do controlador PI, tendo apenas acentuado o problema quando ocorre uma grande diminuição no *setpoint*. Porém, ainda assim, o controlador se comportou de forma consistente. Como exposto na Figura 41.

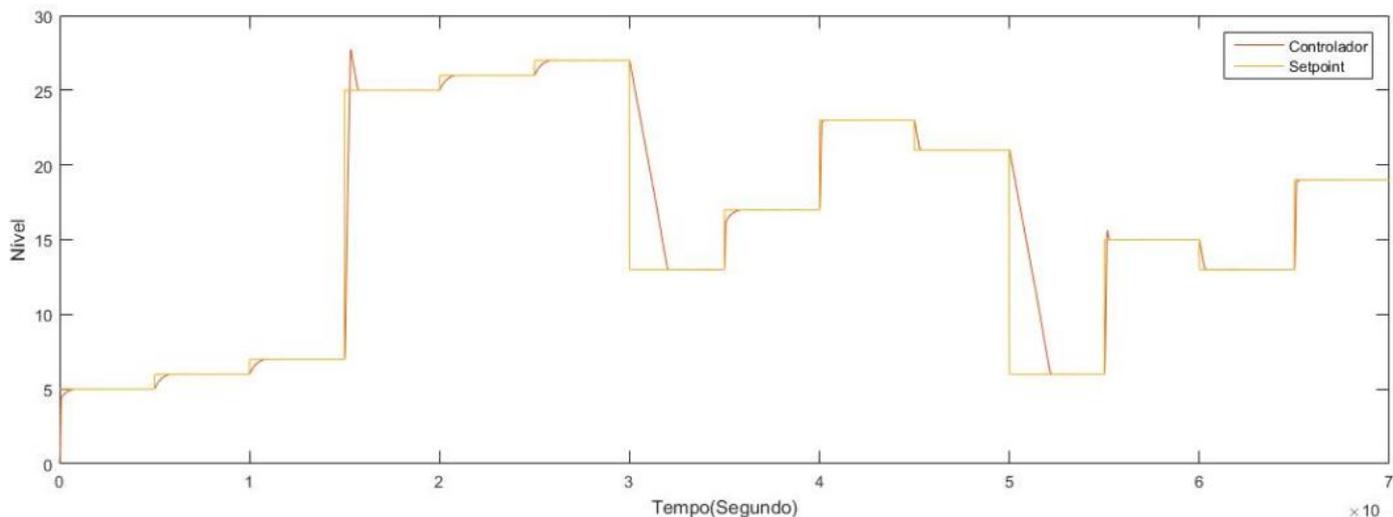


Figura 41: Saída do controlador Fuzzy, do tanque proposto.

Fonte: Autoria própria

O controlador gerou quatro picos de tensão nas regiões de maior diferença entre os valores de *setpoint*. Tirando os picos, o controlador reagiu de forma constante durante todo o tempo. Como é observado na Figura 42.

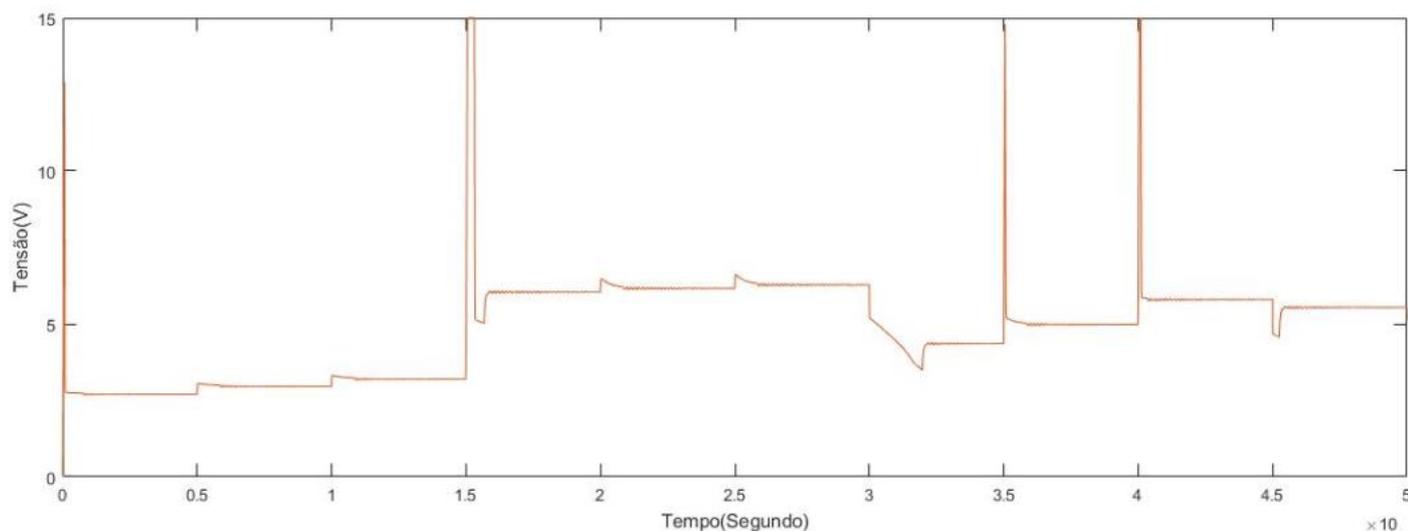


Figura 42: Saída de tensão do controlador Fuzzy, do tanque proposto.

Fonte: Autoria própria

O controlador Fuzzy trabalhou bem melhor que o controlador PI, para o tanque proposto. Tem resposta mais rápida, com exceção das duas regiões de decrescimento do *setpoint*, que acabou gerando uma resposta mais lenta. Como é observado na Figura 43.

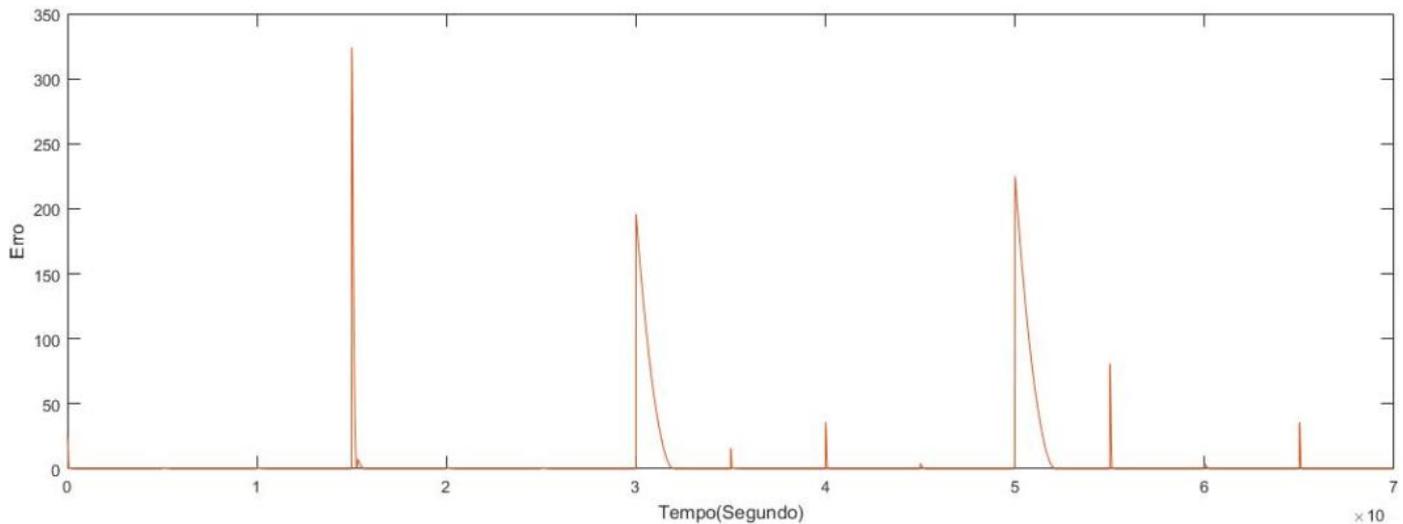


Figura 43: Erro Quadrático do controlador Fuzzy para todo o tanque, do tanque proposto.

Fonte: Autoria própria

Os ensaios práticos tiveram boas respostas. Tendo os controladores resultados melhores para as regiões próximas a 15 centímetros como era o esperado. Apesar de uma maior dificuldade dos controladores, os resultados para regiões por todo o tanque também obteve boas resposta, com os erros próximos a zero, tendo grandes alterações nos erros apenas nas trocas de *setpoints*.

4.2 Resultados Referentes Aos Testes Práticos

Como realizado nos experimentos simulados, primeiramente foram utilizados os testes no tanque da Quanser[®], e inicialmente para regiões próximas ao centro do tanque, para, após a análise, realizar o experimento para o tanque todo.

É preciso levar em consideração que o sistema real apresenta diversos tipos de ruídos, diferente do sistema simulado. Os ruídos na entrada do sensor podem gerar saídas equivocadas para o controlador, acarretando instabilidades no sistema e na atuação dos controladores, fazendo como que os gráficos não fiquem limpos e constantes como um todo.

Foi utilizado o valor de entrada do sensor bruto sem nem um tipo de tratamento nos controladores. Não utilizando de técnicas para manter o sinal de entrada mais estável. É de vital importância levar esse fato em consideração, devido a muitos trabalhos nessa área utilizarem essa técnica, pois, com entradas mais estáveis, os controladores obtêm melhores respostas, assim melhorando o resultado final do sistema.

Essa opção se deu para dificultar a ação dos controladores e, com isso, observar como se comportava com mais esse parâmetro de complexidade no sistema.

4.2.1 Tanque da Quanser®

O sistema obteve um baixo tempo de estabilização e pequenos *overshoot*, se configurando assim uma boa resposta do controlador PI ao tanque da Quanser®. Como visto na Figura 44.

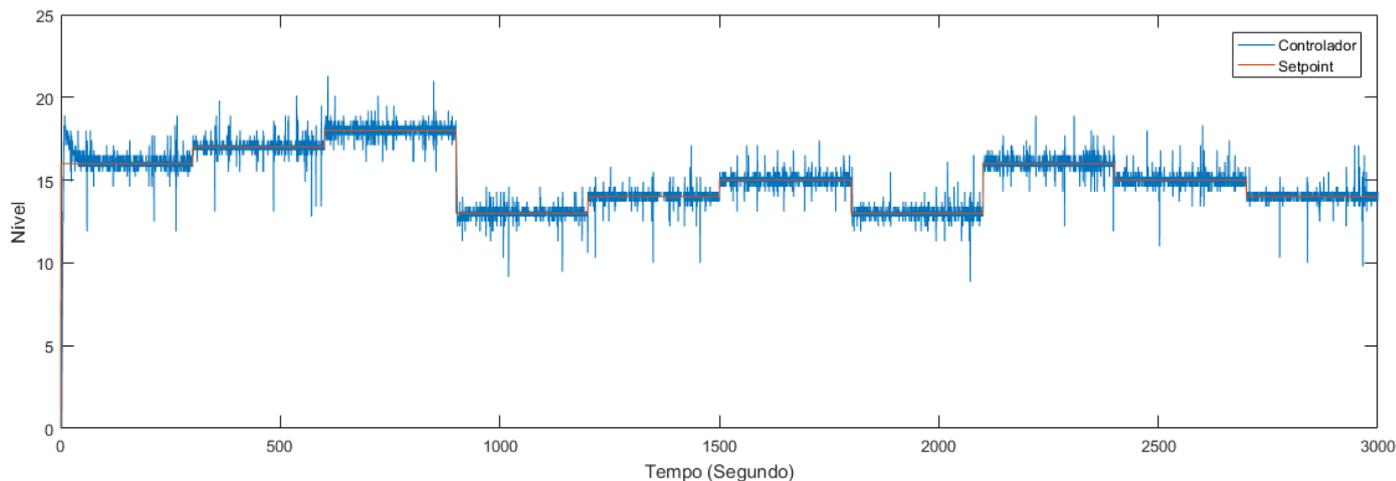


Figura 44: Saída do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

O sinal de saída do controlador foi o que mais sofreu com os ruídos, fazendo com que ele não permaneça estável e oscile muito entre picos e vales, mesmo na região de estabilidade do sistema. Como podemos ver na Figura 45.

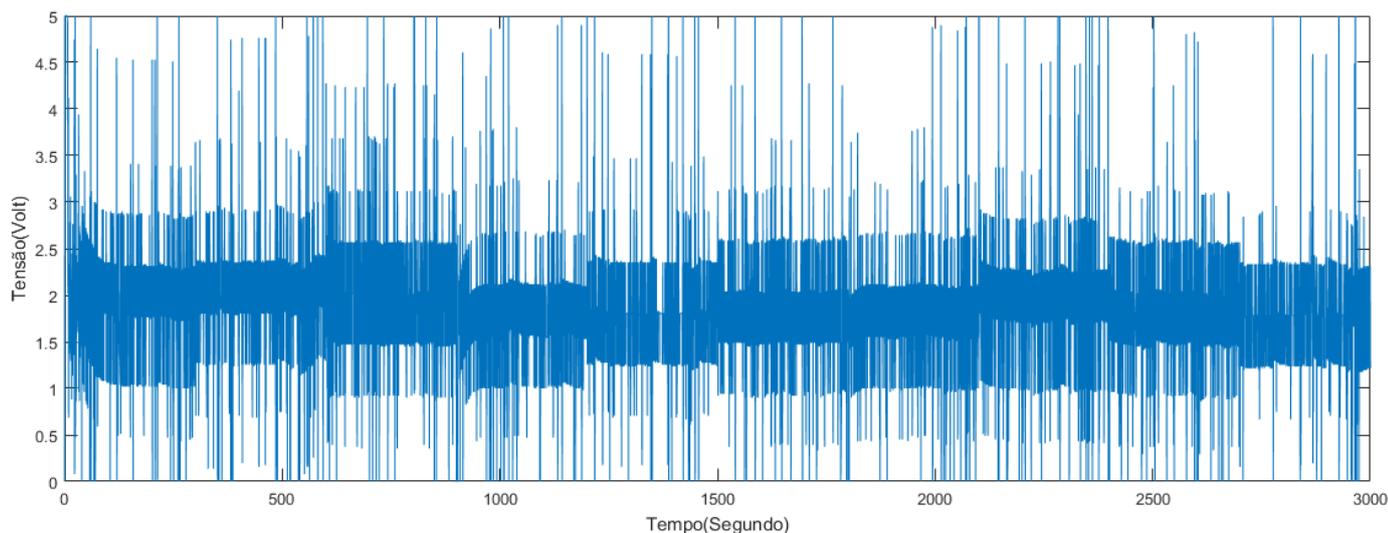


Figura 45: Saída de tensão do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Nota-se que, comparado ao erro quadrático nas simulações, o erro é aparente durante todo o processo. Porém, se mantendo próximo a zero durante todo o teste. Como visto na Figura 46.

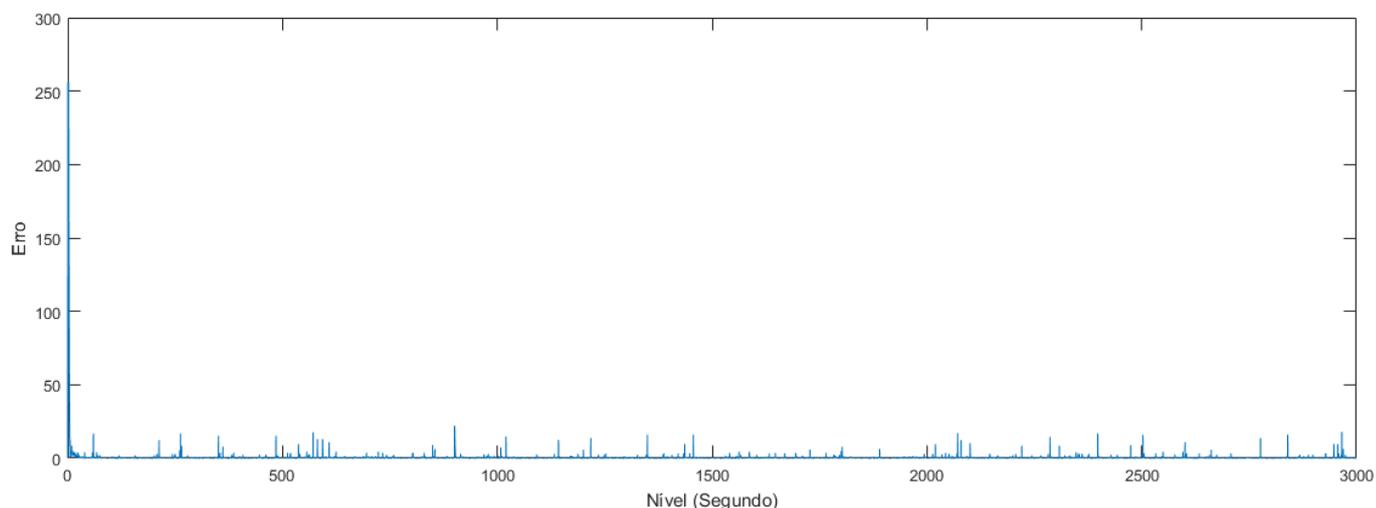


Figura 46: Erro Quadrático do controlador PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

A saída do controlador Fuzzy se comportou de forma oscilatória, porém, conseguiu fazer com que ocorresse o controle durante o processo. Devido às características inerciais do controlador Fuzzy, o mesmo sofre com os ruídos do processo, gerando saídas erradas em cada oscilação que teve que ser recuperada posteriormente com a atuação do controlador, também ocasionando uma atuação do controlador diferente em vários momentos de estabilidade, acarretando instabilidades. Essa aplicação é exposta na Figura 47.

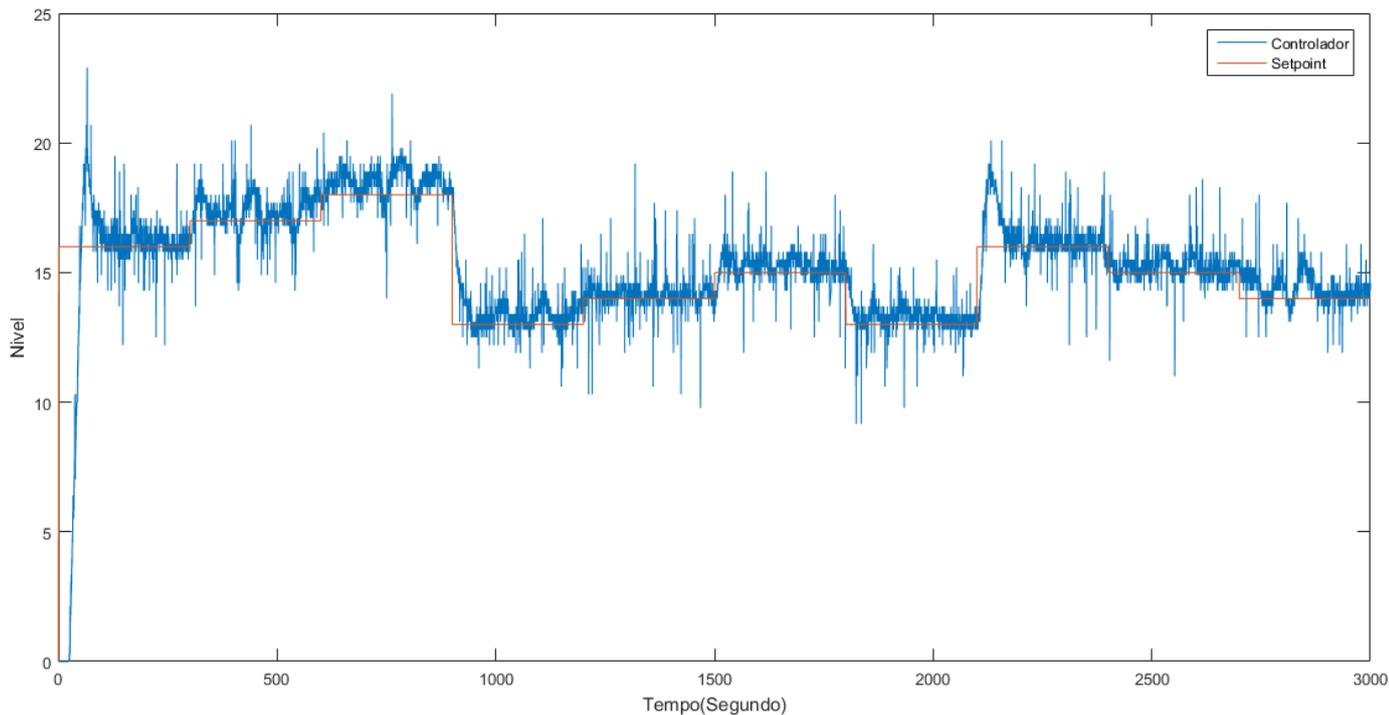


Figura 47: Saída do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

É possível notar, na Figura 48, que, apesar do controlador Fuzzy ter oscilado em relação ao nível, a sua saída de tensão se mostrou mais estável durante todo o processo, gerando um pico de maior intensidade apenas no começo e se mantendo constante durante todo o teste. Esse é um fator importante devido à grande oscilação na tensão aplicada no controlador PI, que, apesar de manter o nível do tanque mais estável, aplicou várias alternâncias seguidas na tensão na bomba. A ocorrência desse fenômeno é devido ao controlador PI ter sido sintonizado de forma a trabalhar mais agressivamente, já o controlador Fuzzy foi sintonizado mais suavemente.

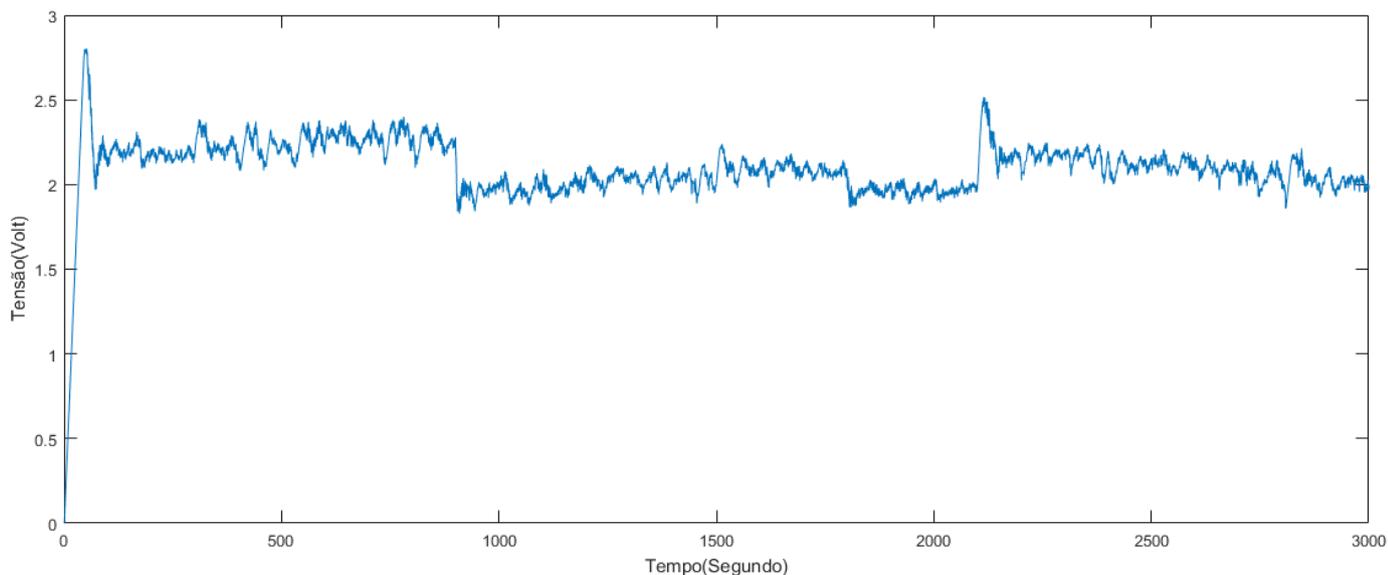


Figura 48: Saída de tensão do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Como era esperado, o erro quadrático do Fuzzy foi maior comparado ao do controlador PI. Porém, diferente do gráfico de nível, o gráfico do erro quadrático não teve sua diferença tão acentuada. Pode-se observar que, mesmo com as oscilações no nível, o erro quadrático do sistema com o controlador Fuzzy foi pequeno. Como é visto na Figura 49.

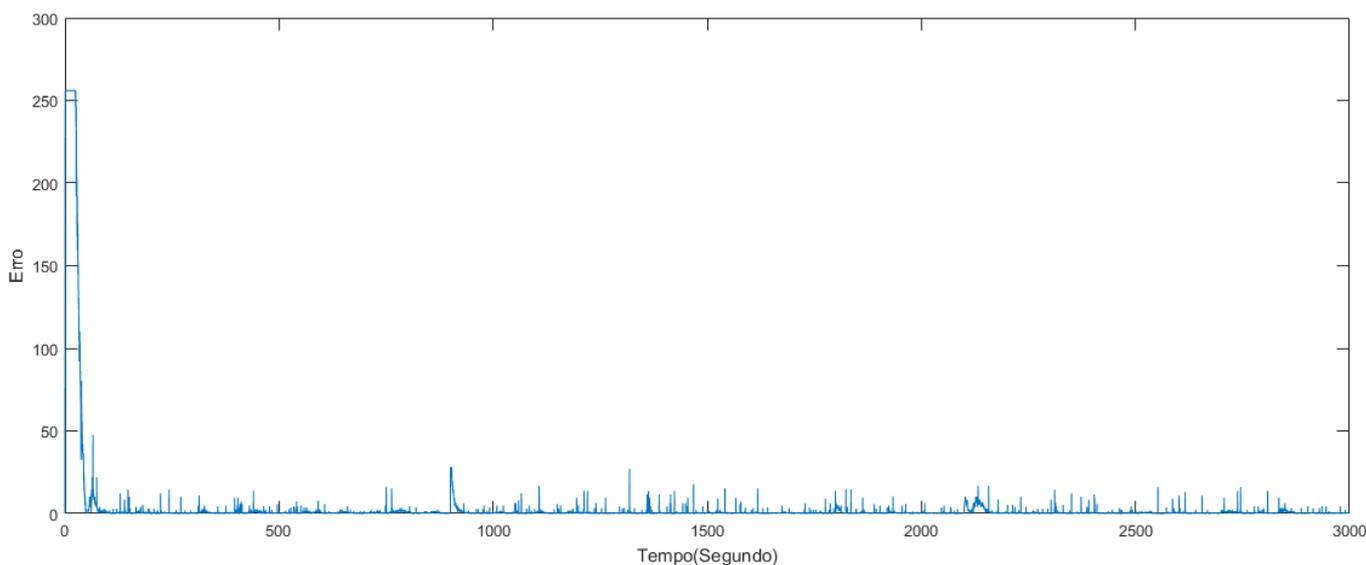


Figura 49: Erro Quadrático do controlador Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

Quanto à análise para pontos espalhados por todo o tanque da Quanser®, podemos ver que ainda ocorreram mais oscilações do que quando aplicando em regiões próximas a 15 centímetros. Devido a em alguns casos as diferenças entre os *setpoints* serem maiores, os controladores são expostos a uma dificuldade maior. Porém, podemos ver que o controlador se comportou bem e se manteve constante durante todo o processo, apesar de toda a variação. Pode-se observar isso na Figura 50.

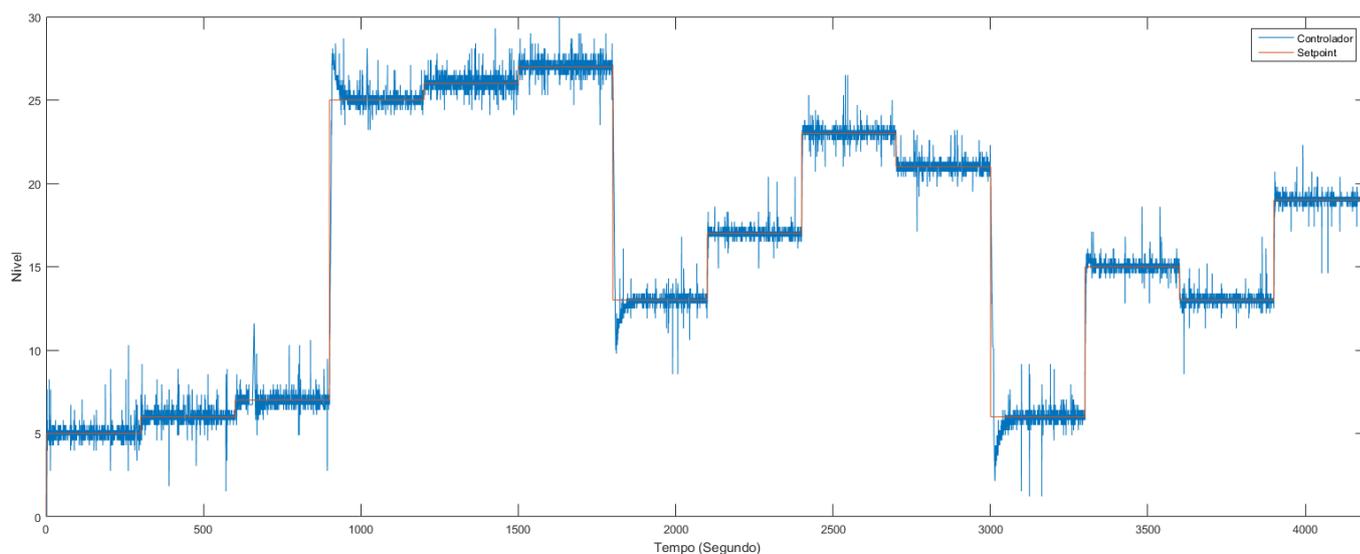


Figura 50:Saída do PI, do tanque da Quanser®.

Fonte: Autoria própria

O controlador PI foi aplicado nas regiões próximas de 15 centímetros, o mesmo continuou aplicando tensões com variações durante todo o processo. Sendo assim, o PI se mostrou inconstante, característica muito inerente à variação de sinal do sensor, gerada pelo ruído. Demonstrado na Figura 51.

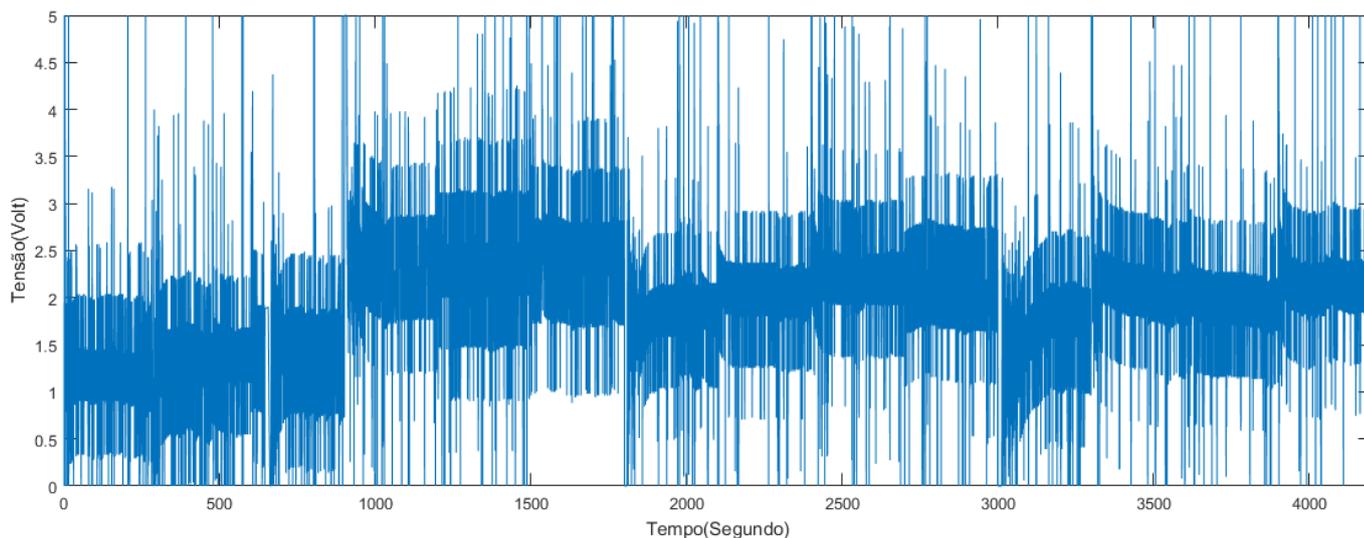


Figura 51: Saída de tensão do PI, do tanque da Quanser®.
Fonte: Autoria própria

O erro quadrático continuou baixo, mesmo esse teste sendo mais complexo. Isso demonstra a qualidade do controlador PI, como se vê na Figura 52.

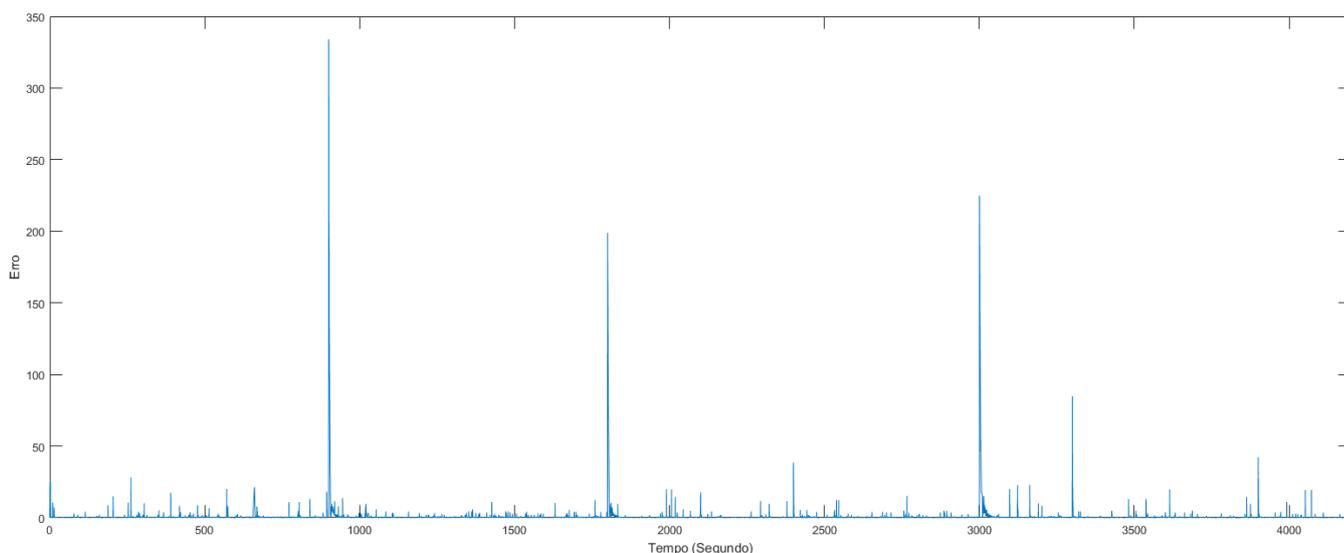


Figura 52: Erro Quadrático do controlador PI, do tanque da Quanser®.
Fonte: Autoria própria

O controlador Fuzzy se comportou melhor nesse teste, tendo uma maior estabilidade no processo e menor oscilação durante todo o *setpoint*. Isso é importante, pois demonstra a robustez do controlador. Outro fato possível de se observar é que, nesse caso, o controlador obteve menos e menores *overshoots* quando comparado ao controlador PI. Isso é válido, pois para situações extremas, nas quais o controlador irá trabalhar no limite dos reservatórios pode ocorrer vazamentos em casos de grandes *overshoots*. Observa-se isso na Figura 53.

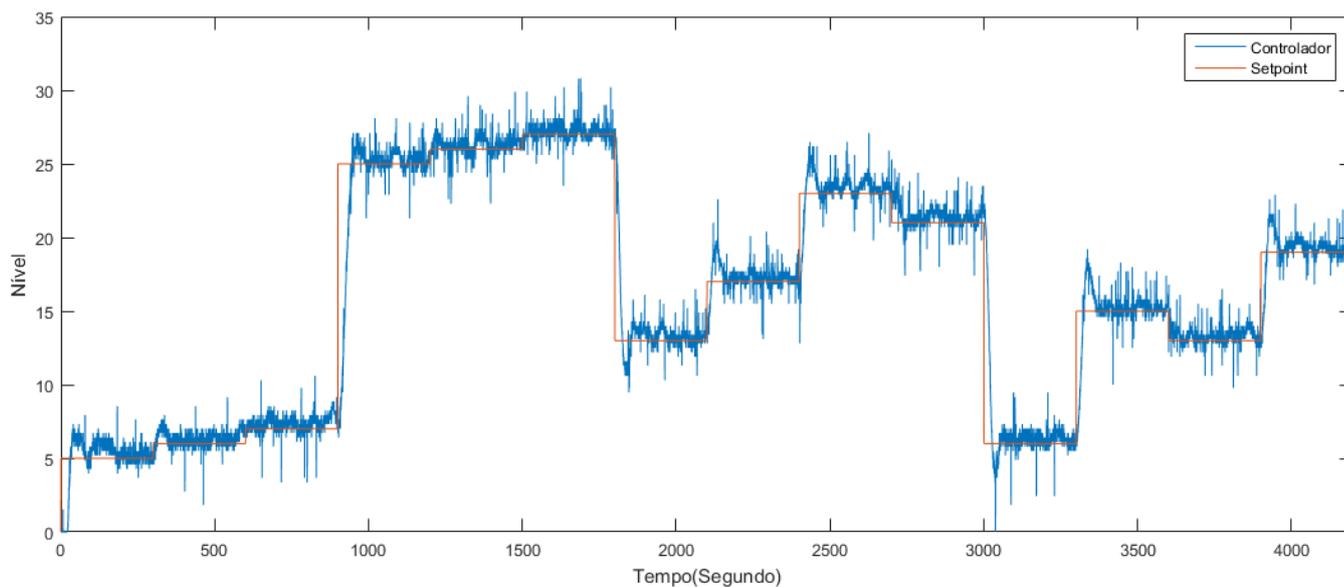


Figura 53: Saída do Fuzzy, do tanque da Quanser®.
Fonte: Autoria própria

Com uma maior estabilidade no processo, também é observado que a tensão aplicada se manteve estável, novamente. Como é visto na Figura 54.

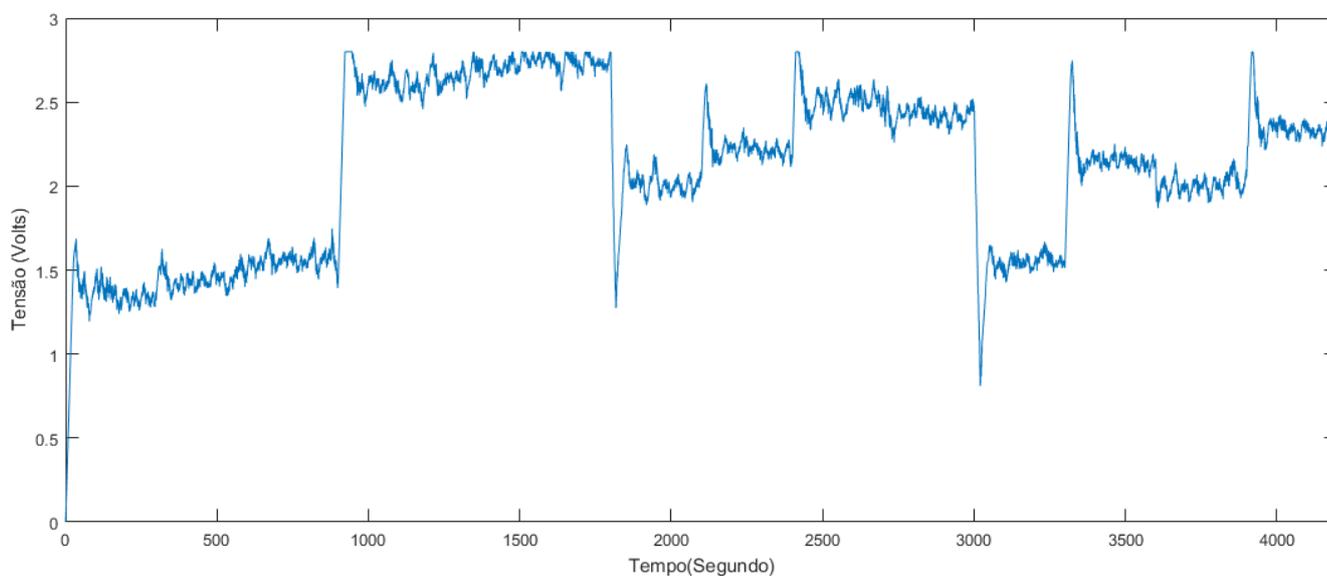


Figura 54: Saída de tensão do Fuzzy, do tanque da Quanser®.
Fonte: Autoria própria

Assim como no caso da tensão, que se manteve estável devido à estabilidade do processo, observa-se que o erro quadrático também diminuiu, se mantendo bem próximo de zero durante todo o processo, dando apenas os picos quando ocorria alterações no *setpoint*. Pode-se observar na Figura 55.

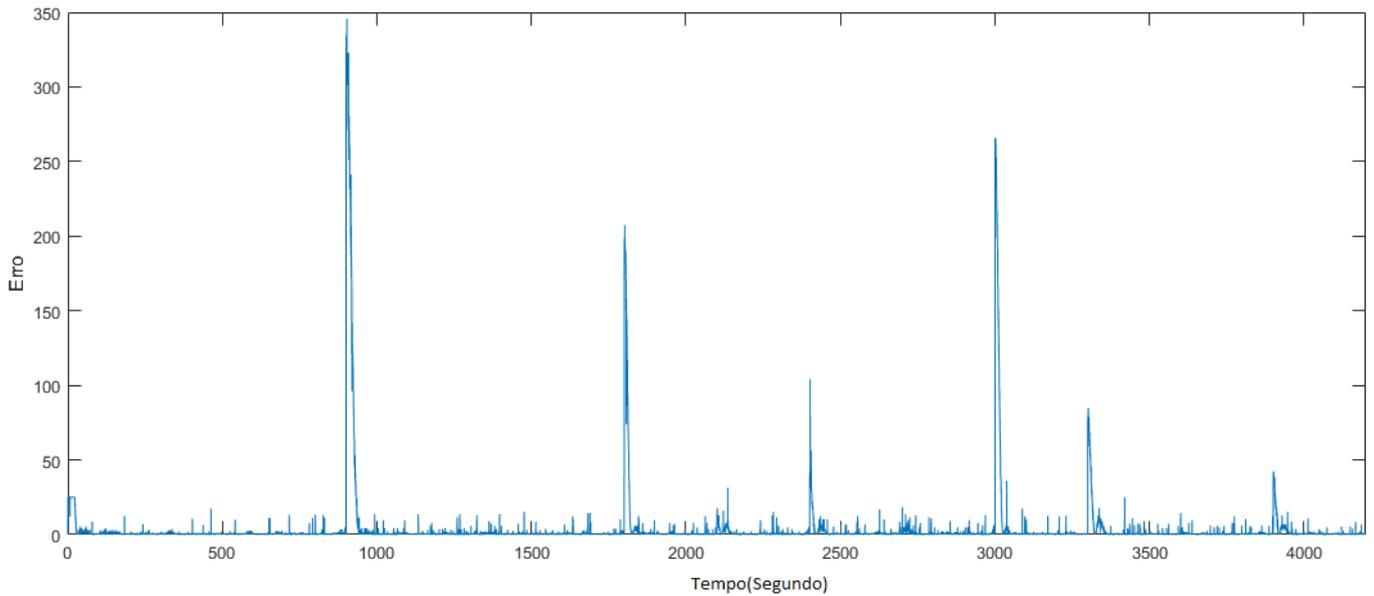


Figura 55: Erro Quadrático do controlador Fuzzy, do tanque da Quanser®.
Fonte: Autorial própria

4.2.2 Tanque Proposto

Nesta seção, inicia-se a análise dos controladores quando estes são aplicados ao tanque proposto. Primeiramente, serão aplicados controladores nas regiões próximas a 15 centímetros, como é de padrão, e, posteriormente, serão aplicados nas regiões espalhadas pelo tanque como um todo. Na Figura 56, podemos ver o resultado do nível em relação ao controlador PI. O controlador obteve exceto no processo de controle do tanque. O único ponto negativo foram os *overshoots*, quando ocorre uma maior diferença entre os *setpoints*.

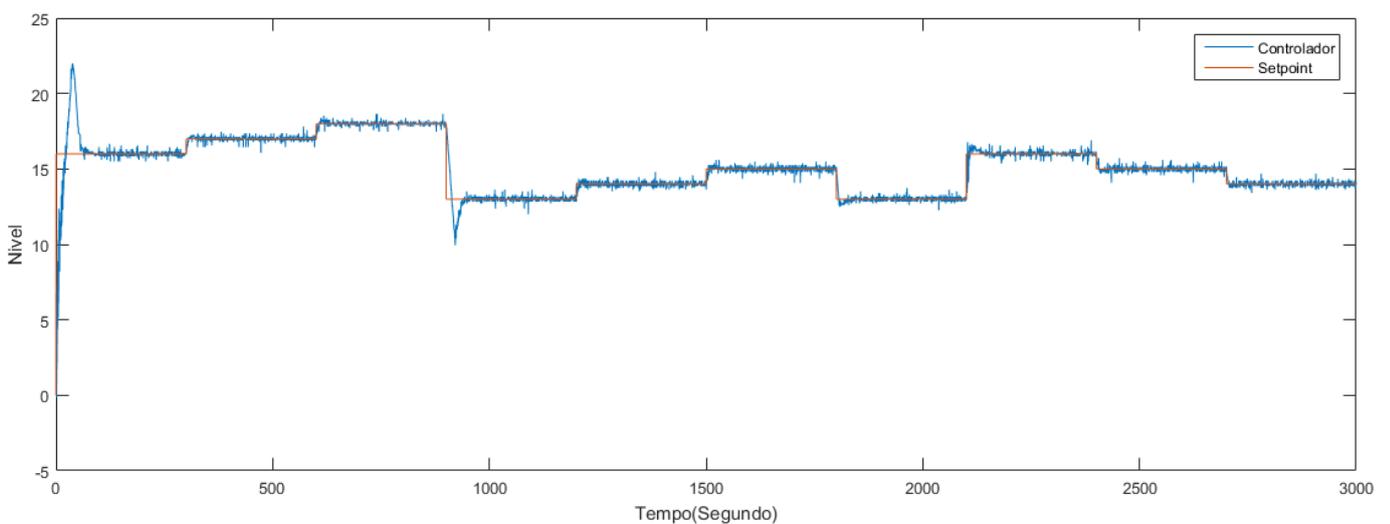


Figura 56: Saída do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.
Fonte: Autorial própria

Assim como no tanque da Quanser[®], o nível de tensão aplicado pelo controlador PI foi muito oscilatório, acarretando muitas variações durante todo o processo, tendo dois grandes picos e três grandes vales durante todo o processo. Observa-se isso na Figura 57.

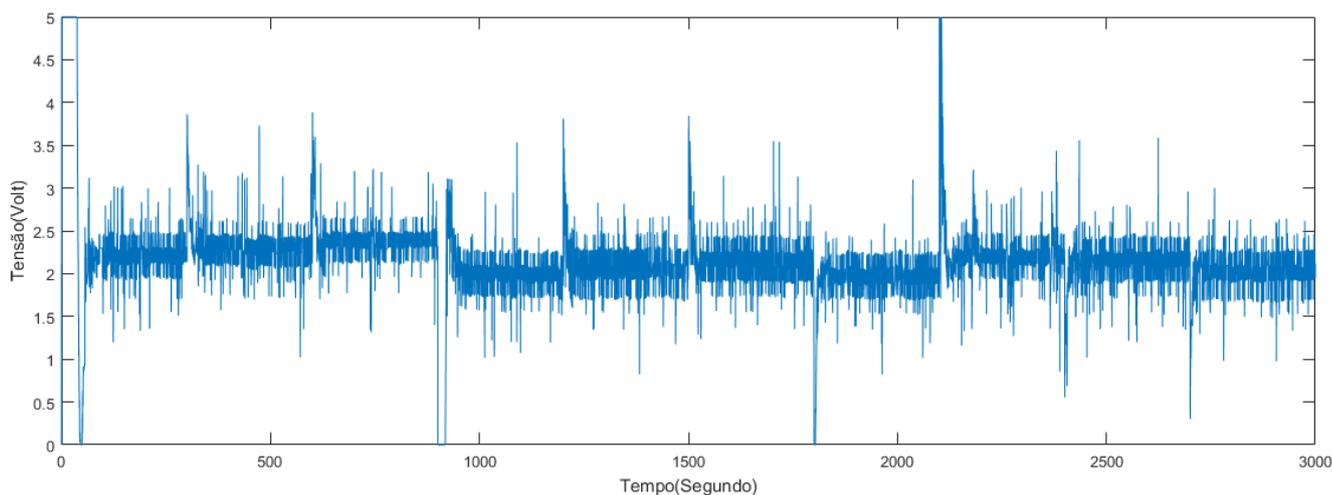


Figura 57: Saída de tensão do PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

O erro quadrático nesse teste foi baixo, se preservando a maior parte do tempo próximo de zero, reforçando a qualidade do controlador aplicado. Apenas obteve o pico inicial. Como é visto na Figura 58.

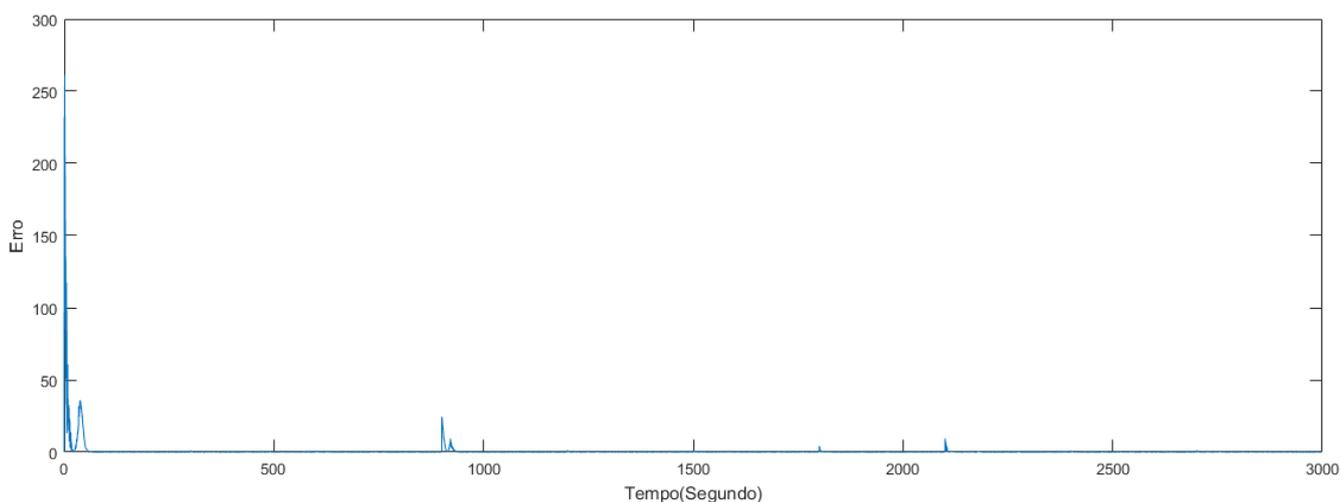


Figura 58: Erro Quadrático do controlador PI para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

Na Figura 59 vê-se o resultado do controlador Fuzzy e que apresentou uma oscilação, mas, se manteve próximo ao *setpoint* durante todo o tempo, porém, com um

ajuste mais fino do controlador é possível obter um resultado equivalente ao do controlador PI. Ocorreram *overshoots* menores, principalmente quando comparado ao controlador PI.

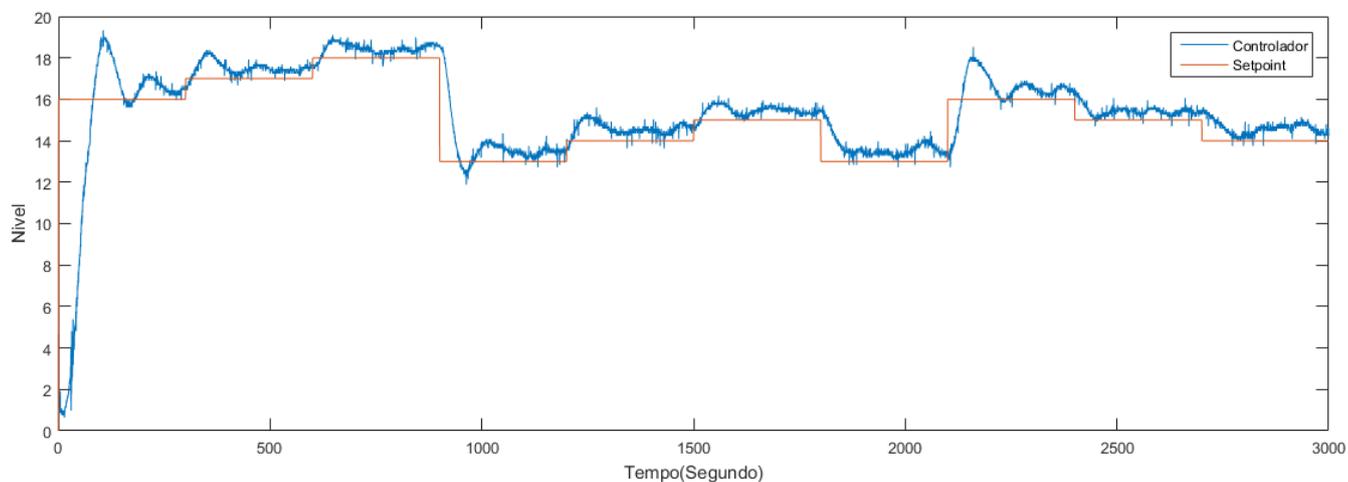


Figura 59:Saída do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

Como as regiões são muito próximas, observa-se que o gráfico se manteve com tensões próximas durante a maior parte do processo. Isso só reforça uma característica importante do controlador Fuzzy, que é a de manter a tensão aplicada no motor estável. Podemos visualizar isso na Figura 60.

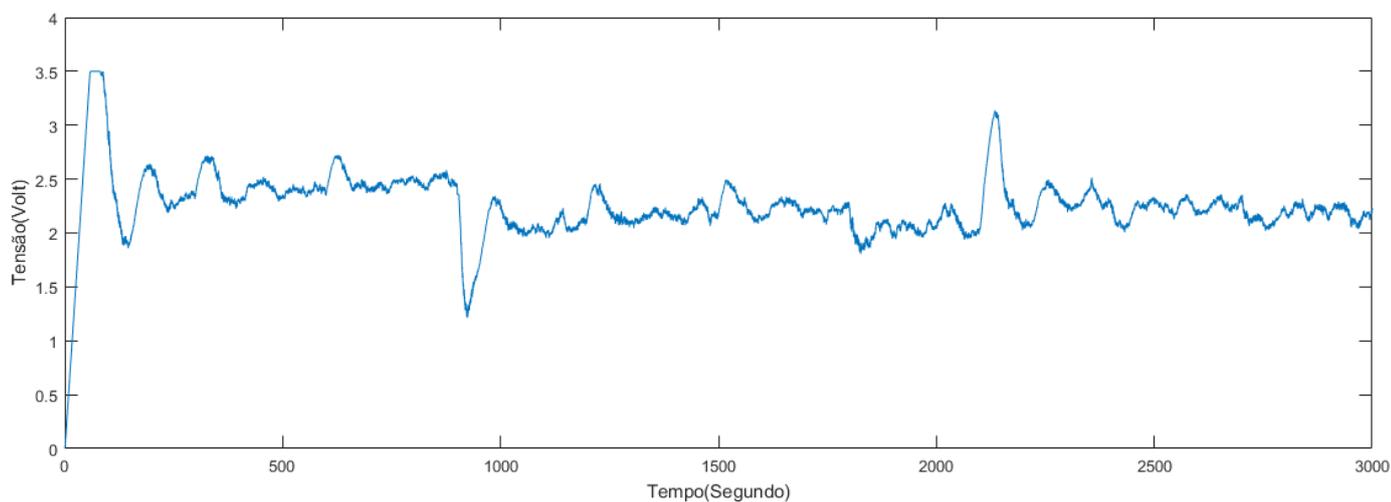


Figura 60:Saída de tensão do Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

Quando foi aplicado o erro quadrático, o sistema mostrou um erro baixo, se mantendo constante a maior parte do tempo, sendo o gráfico muito similar ao do

controlador PI. O gráfico se manteve com erros baixos, ocorrendo apenas um pico no início dos testes. Exposto na Figura 61.

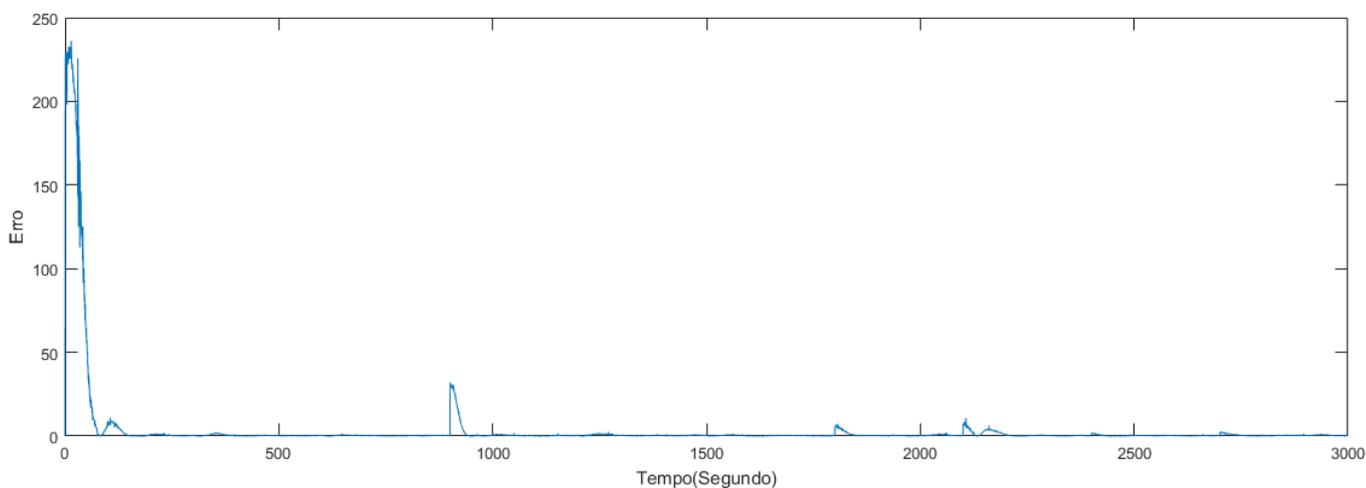


Figura 61: Erro Quadrático do controlador Fuzzy para regiões próximas a 15 cm de altura, do tanque proposto.

Fonte: Autoria própria

Observa-se, na Figura 62, que o controlador PI obteve um ótimo desempenho durante todo o teste. Manteve-se estável e com rápidas transições quando as diferenças entre *setpoints* foram pequenas. Porém, acentuou ainda mais o *overshoot* que já demonstrava no teste anterior.

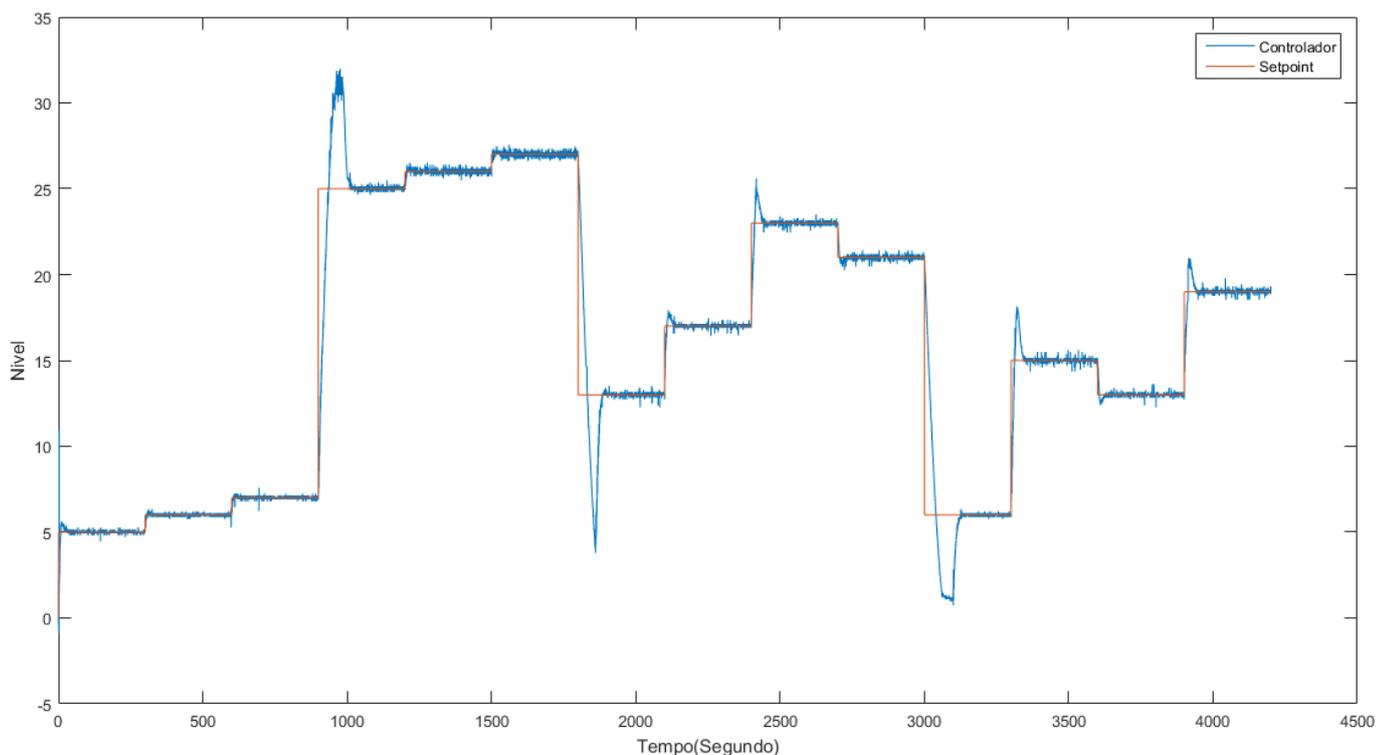


Figura 62: Saída do PI, do tanque proposto.

Fonte: Autoria própria

Também como no teste anterior, a tensão de saída do controlador é variante em todo o processo, sendo o principal problema do controlador PI sintonizado neste trabalho. O PI teve, ao todo, oito picos, com os quais alcançou a máxima da tensão. Também teve cinco vales, e em dois casos manteve a tensão em zero. Observa-se isso na Figura 63.

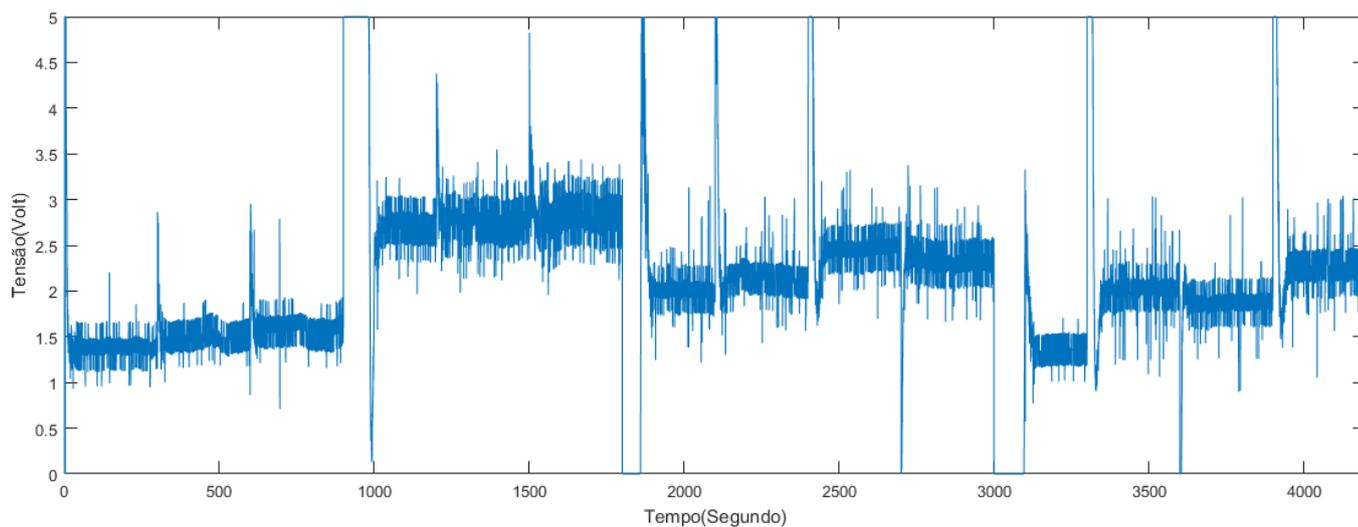


Figura 63: Saída de tensão do PI, do tanque proposto.

Fonte: Autoria própria

O gráfico de erro quadrático sai com os erros próximos de zero, tendo picos somente em grandes alterações nos *setpoints*. Demonstrando a boa resposta do controlador PI isso exposto na Figura 64.

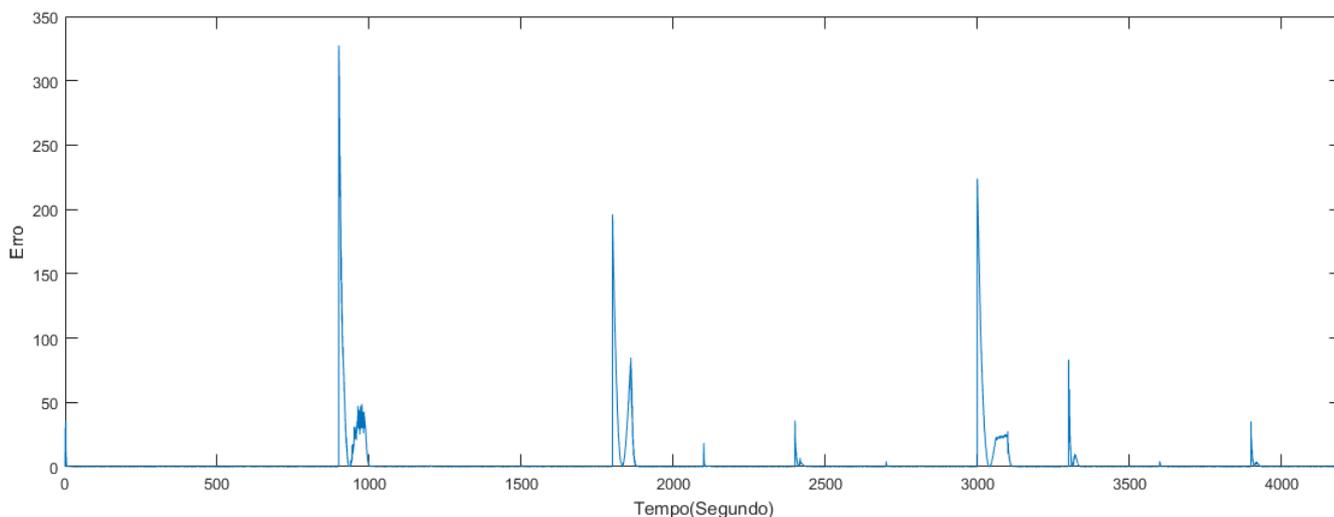


Figura 64: Erro Quadrático do controlador PI, do tanque proposto.

Fonte: Autoria própria

O comportamento do controlador Fuzzy foi melhor que no teste anterior. O controlador se demonstrou estável, não obtendo grandes *overshoots*, porém continua com transições lentas entre os *setpoints*. Assim observado na Figura 65.

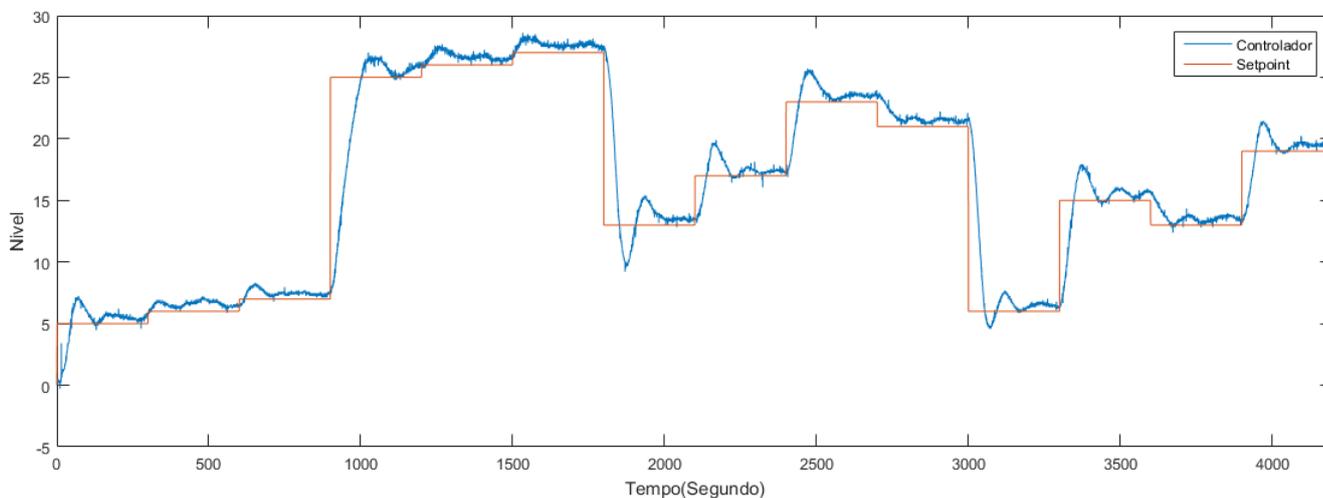


Figura 65: Saída do Fuzzy, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

O gráfico de tensão aplicado pelo controlador Fuzzy, para esse teste, manteve-se mais estável que o do controlador PI, porém, menos estável do que o do teste anterior. Essa condição já era esperada devido às grandes alterações de *setpoint*. Como pode-se observar na Figura 66.

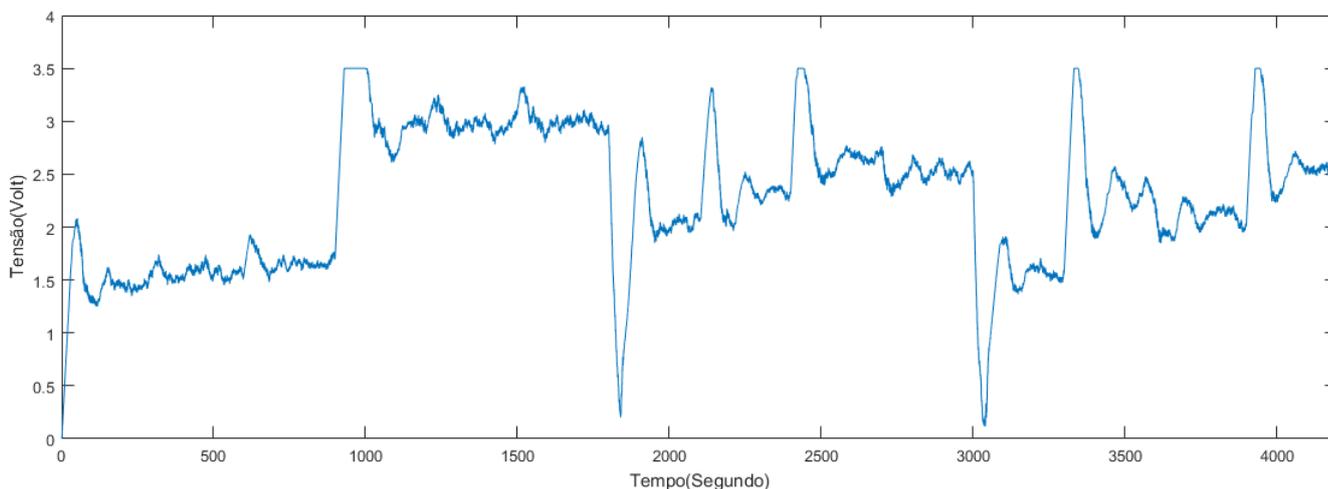


Figura 66: Saída de tensão do Fuzzy, do tanque proposto.
Fonte: Autoria própria

Assim como o gráfico de convergência de nível se comportou melhor, o gráfico de erro quadrático obteve uma melhor saída, se mantendo próximo de zero, com picos nas regiões de transições. Como se vê na Figura 67.

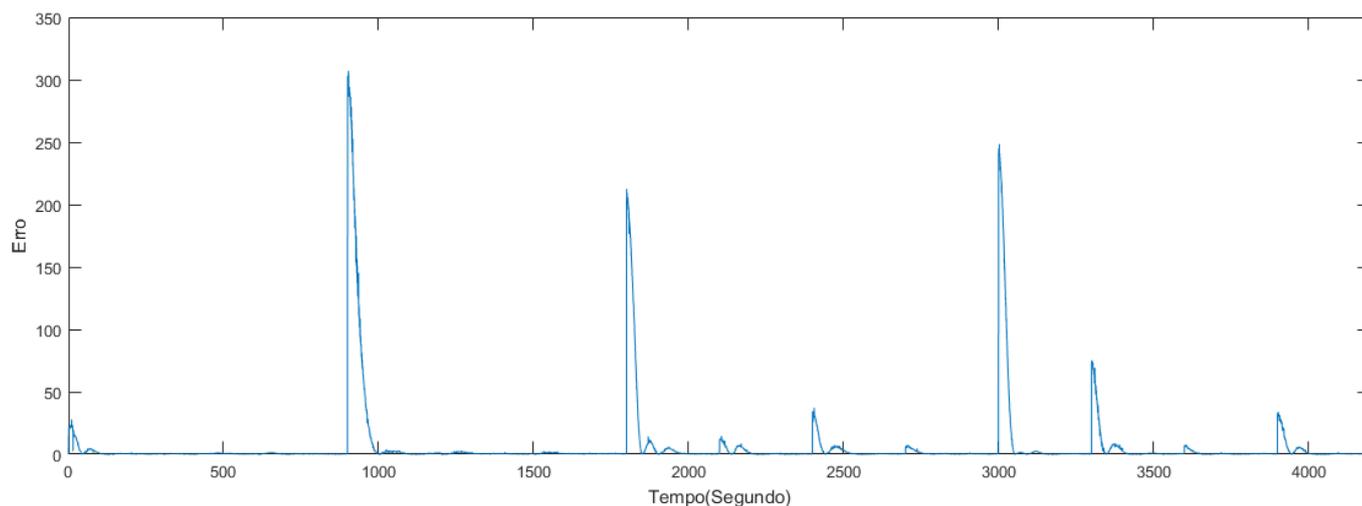


Figura 67: Erro Quadrático do controlador Fuzzy, do tanque proposto.

Fonte: Autoria própria

Como esperado, nos ensaios práticos os controladores obtiveram mais dificuldade quando comparados com os ensaios simulados. Um dos motivos para esse ocorrido pode ser devido a variáveis que não foram adicionadas ao modelo matemático, como ruídos, distorções da forma de trabalhar do motor e mau funcionamento da instrumentação utilizada no projeto.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

As avaliações sobre o projeto iram ter com base o funcionamento dos controladores e suas respostas nos sistemas. Serão validados os seus *overshoots*, tempo de estabilização, erro quadrático e tensões aplicadas no sistema. Estas aplicações se dão para os dois conjuntos de *setpoint* e para os dois tanques.

Vale salientar que, quando utilizados os pontos de operação próximos da região de 15 cm, há uma demanda bem menor do desempenho dos controladores devido à alteração de poucos centímetros, gerando, assim, resultados mais próximos. Porém, quando utilizadas todas as regiões dos tanques, há uma utilização maior dos desempenhos dos controladores, além de ser possível observar melhor o seu comportamento com as alterações do sistema.

Na parte simulada inicialmente, no tanque da Quanser[®], pode-se observar uma convergência muito boa entre os controladores, ambos obtendo boas respostas tanto para as regiões próximas ao *setpoint* de 15 cm de nível, quanto para o outro conjunto de pontos. O controlador PI mostrou uma resposta mais rápida e robusta do que o controlador Fuzzy, devido à sua configuração, que pode fazer alteração das tensões aplicadas na bomba de forma mais rápida. Já o controlador Fuzzy trabalha com o decréscimo e acréscimo da tensão que está sendo aplicada na bomba, fazendo com que o seu funcionamento ocorra de forma mais lenta, porém, com a mesma precisão, resultando em uma resposta mais demorada quando ocorrem diminuições no *setpoint* e o controlador acaba demorando a responder.

Ambos os controladores tiveram pequenos *overshoots* e, como as suas respostas eram rápidas, os tempos de estabilização foram todos pequenos. Ambos os controladores tiveram respostas próximas, modificando, principalmente, as suas formas de atuação, ainda assim alcançando resultados próximos.

Nas simulações, como os controladores estavam sem interferências externos, ambos trabalharam de forma satisfatória. Porém quando os controladores sofreram efeitos dos agentes externos, como ruídos e outro nos experimentos práticos, aparecem dificuldades de sintonia fina do controlador Fuzzy. O controlador PI se comportou bem, pois conseguiu isolar o erro apenas nos instantes de tempo que o mesmo ocorreu. Já o controlador Fuzzy não conseguiu compensar o erro gerado, acarretando em oscilações

em alguns momentos. Foram feitos testes para tentar otimizar o máximo do controlador Fuzzy, porém não foi possível compensar completamente o mesmo.

Os testes no tanque proposto obtiveram boas respostas, que consiste em resposta com pequeno tempo de conversão e também com pequeno *overshoot*. Inicialmente, apareceu *overshoot* no controlador PI que não tinha aparecido no tanque da Quanser[®], consequentemente aumentando o tempo de estabilização, enquanto no controlador Fuzzy as suas respostas foram praticamente sem *overshoot*, acontecendo apenas uma vez. Nesse tanque, devido a suas características de variação de formato, fica dificultada a atuação do controlador. Com isso, é possível observar a melhor atuação do Fuzzy para com o PI, nestes tipos de sistemas mais complexos. No que concerne ao sinal aplicado na bomba pelos controladores, mais uma vez o controlador Fuzzy sintonizado se mostrou um pouco mais lento, porém, mais estável na transição de *setpoints*.

Devido às oscilações constantes do sensor, essas ocorridas devido ao ruído que se verificou no sistema. Foram observados os tanques durante a execução dos testes, em alguns momentos a saída manteve-se constantes no sistema, é mesmo assim no gráfico gerado com a leitura do sensor se mostrou com oscilações.

Em relação aos controladores, é importante salientar que o PI, devido à sua forma de atuação, quando ocorre um ruído, o erro fica inerente apenas naquele momento em que o sensor obteve a leitura errada. Já no controlador Fuzzy, como trabalha com acréscimo e decréscimo da tensão aplicada na bomba, quando acontece um erro, o controlador tem que compensá-lo nas leituras seguintes, diminuindo ou aumentando a tensão para o valor correto. Sendo assim, o controlador Fuzzy sofre mais com os ruídos do sistema.

Nos experimentos práticos, os resultados se apresentaram de maneira similar. Tanto no tanque da Quanser, como no tanque proposto, ambos convergiram, chegando aos *setpoints* desejados, tendo o controlador PI se comportado de melhor forma, se comparado ao Fuzzy que foi sintonizado. Entretanto, este obteve *overshoots* menor em relação ao controlador PI, fator muito importante devido ao possível surgimento de problemas para quando se trabalha com níveis muito críticos, próximos ao limite do sistema.

O gráfico de tensão aplicada na bomba apontou o Fuzzy como melhor em todos os processos, uma vez que se manteve mais constante em todos os experimentos, mesmo com as oscilações e ruídos na entrada. O gráfico do erro quadrático mostrou

somente a qualidade das convergências dos gráficos de nível, e, mesmo com as oscilações nos gráficos de níveis do controlador Fuzzy, os gráficos de erro quadrático se mantiveram próximos ao zero, com oscilações apenas nas transições de *setpoint*.

Levando em consideração os resultados obtidos é como os controladores funcionam, podemos chegar a outra conclusão sobre a utilização em sistemas reais de cada controlador, que é a adaptabilidade do controlador Fuzzy, ela é maior que a do controlador PI, levando em consideração que foi utilizado o mesmo controlador para ambos os tanques, assim como nas simulações é nos testes prático. Já o controlador PI teve que ser dimensionado para cada tanque. Então como sistemas reais o conhecimentos de todos os detalhes do processo para modelagem correta, requer um custo maior para o processo, é o controlador PI necessita desses dados para uma sintonia adequada, ter um controlador Fuzzy soluciona viável esse problema. Já para sistemas aonde é possível prever todos os elementos imersos dentro dele, o controlador PI pode gerar melhores soluções.

5.1 Trabalhos Futuros

Algumas perspectivas podem ser decorridas desse trabalho, as quais podem gerar trabalhos futuros. Quais sejam:

- Aplicar o controlador para tanques acoplados;
- Utilizar outras formas de tanques;
- Utilizar técnicas de linearização na entrada dos sensores;
- Implementar rotinas que simulem os ruídos nos testes simulados;
- Utilizar filtros para amenizar ruídos nos testes práticos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDUINO. **Arduino MEGA 2560**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

ARÚJO JÚNIOR, José Medeiros de; LINHARES, Leandro Luttiane da Silva; ARAÚJO, Fábio Meneghetti Ugulino de. **SISTEMA DE CONTROLE INFERENCIAL APLICADO NO AJUSTE DA CONCENTRAÇÃO E PRODUÇÃO DE MISTURAS**. In: Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, 2010, Campina Grande.

ANDRÉ H. M. PIRES, Álvaro r. De figueiredo1, Alcemy g. V. Severino1, Michel j. Da silva1, Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo, **OTIMIZAÇÃO DE CONTROLE FUZZY USANDO ALGORITMO GENÉTICO**, 2013, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

BARRADO, A., R. Vazquez, A. Lazaro, J. Pleite, J. Vazquez and E. Olias (2003), **New DC-DC Converter with Low Output Voltage and Fast Transient Response**, in **Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Conference APEC'03**, Miami, Florida, USA.

BARROS, L. S., D. F. P. Moura e W. S. Mota (2006), **Métodos Matriciais para Linearização e Representação no Espaço de Estados de Sistemas Elétricos de Potência Contendo Máquinas de Indução Duplamente Alimentadas Operando como Geradores Eólicos**, Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE 2006, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

BOLTON, William. **Mecatrônica: Uma abordagem multidisciplinar**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 664 p.

CAMARGOS, Fernando Lauderis (2002), **Lógica Nebulosa: uma abordagem filosófica e aplicada**, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil.

CAVALCANTI, A. L. O., A. L. Maitelli and A. B. Fontes (2008), **A Phase Margin Metric for Multi-Model Multivariable MPC**, **16th Mediterranean Conference on Control and Automation**, pp. 1874–1879, Ajaccio, France.

C.MICHEL, Hugo C.; BRAGA, Anisio R.; POLITO-BRAGA, Carmela M.. **Sistema De Tanques Acoplados E Descoplados (Stad) Para O Estudo De Controle E Automação De Processos: Modelagem e Controle.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 18., 2010, Bonitos. p. 3058 - 3064.

FIGUEIREDO, L. e JOTA, F. (2004). **Implementação de técnicas de controle adaptativo ao resfriamento de tiras a quente.** In Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática. p 1-6, 2004.

FREITAS, W.; FRANÇA, A. M. **Modelagem E Análise Dinâmica De Dispositivos Dstatcom Usando O Simpowersystems Para Matlab/Simulink®.** Sba: Controle & Automação - Sociedade Brasileira de Automática, Campinas, v. 16, p. 187 - 199, Jun 2005. ISSN 0103-1759.

FONSECA, A., F.de Ara o and M. C. Rodrigues (2012), Hierarchical Fuzzy Control, In: Iqbal, S., N. Boumella and J. C. F. Garcia, **Fuzzy Controllers: Recent Advances in Theory and Applications**, InTech, Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/fuzzy-controllers-recent-advances-in-theory-and-applications/hierarchical-fuzzy-control>. Acesso em: 25 de outubro de 2012.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos.** Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, |1997.

GUERRA, F. , SOARES, B. (2005). **Implementação De Controladores Pid Utilizando Lógica Fuzzy E Instrumentação Industrial.** VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São Luís, 2005.

GODER, D. & W. R. PELLETIER (1996), **V2 Architecture Provides Ultra-Fast Transient Response in Switch Mode Power Supplies, in Proceedings of High Frequency Power Conversion, HFPC 1996, Las Vegas, USA.**

GOLNARAGHI, Farid; KUI, Benjamin C. **Sistemas de Controle Automático.** 9. ed. Rio de Janeiro: Gen, 2012

GOSMANN, Hugo Leonardo. **Um Sistema Multivariável De Tanques Acoplados Para Avaliação De Técnicas De Controle.** 2002. 93 f. - Curso de Mestrado em

Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Elétrica, Brasília, 2002.

GREGA, W. E MACIEJCZYK, A. **Digital control of a tank system.** *IEEE Transactions on Education*, 37(3):271–276, agosto de 1994.

JOHANSSON, K. H., (2000) **The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero.** *IEEE Transactions on Control Systems Technology*,8(3):456–465.

LUIZ, C. C., Silva, A. C., Coelho, A. A. R., e Bruciapaglia, A. H. **Controle adaptativo versus controle fuzzy: Um estudo de caso em um processo de nível.** *SBA Controle & Automação*, 8(2):43–51, agosto de 1997.

LUNA FILHO, Fernando de Melo; Gosmann, Hugo Leonardo; bauchspiess, adolfo. In: congresso brasileiro de automação, 14., 2002, natal. **Controle fuzzy para sistema de nível de líquidos.** Natal: CNPq, 2002. P. 3017 - 3022.

MAIA, C. A. e P. Resende (1998), **Um Controlador Neural Gain Scheduling para Plantas Não-lineares**, *SBA Controle & Automação*, 9(3):135-140.

MATHWORKS®. MATLAB Documentation Center. **MathWorks - Matlab And Simulink® For Technical Computing**, 2013. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/documentation-center.html>>. Acesso em: 23 Julho 2013.

MATLAB. **Matlab version R2014b**. Natick: MathWorks, Inc., 2014. Disponível em: <<http://www.mathworks.com>>.

MATLAB. **Matlab version R2015a**. Natick: MathWorks, Inc., 2014. Disponível em: <<http://www.mathworks.com>>.

MATHWORKS (Estados Unidos) (Ed.). **Fuzzy Logic Toolbox™: User's Guide**. Desconhecido: Mathworks, 2007. 333 p.

NORMEY-RICO, J. E. **Projeto de controladores PID industriais**. Departamento de **Automação e Sistemas**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

OGATA, K. **Matlab for Control Engineers**. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2008. ISBN 0-13-615077-2.

OGATA, K. **Engenharia De Controle Moderno**. Tradução de Heloísa Coimbra de Souza. 5a. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

QUANSER INC. **Coupled-Tank Control Laboratory – Instructor Manual**. Markham, Ontario, Canadá: Quanser Inc., 2008.

QUANSER, Inovantion Educate (2000), **Manual Coupled Water Tank Experiments**.

Simões, Marcelo & Ian Shaw (2001), **Controle E Modelagem Fuzzy**, Edgard Blucher LTDA, São Paulo, Brasil.

SILVA, G., DATTA, A. e BHATTACHARYYA, S. (2002). **New results on the synthesis of PID controllers**. *IEEETransactionsonAutomaticControls*. v. 47, n. 2, p 241-252, 2002.

SOTO, A., P. Alou and J. A. Cobos (2006), **Non-Linear Digital Control Breaks Bandwidth Limitations, in Proceedings of Applied Power Electronics Conference, APEC 2006, Dallas, USA**.

SUMATHI, S.; PANEERSELVAM, Surekha. **Computational intelligence and paradigms: theory & applications using MATLAB**. Boca Raton, Fl: Taylor And Francis Group, Llc, 2010. 821 p

TAKATSU, H., Itoh, T., e Araki, M. **Future needs for the control theory in industries: report and topics of the control technology survey in the japanese industry**. *Journalof Process Control*, 8(5-6):369–374, 1998.

URQUIZO, Arturo. **Esquema de un controlador PID**. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:PID_controllers#/media/File:Controlador_pid.svg>. Acesso em: 25 nov. 2016.

VALE, Marcelo Roberto Bastos Guerra. **Análise Comparativa Do Desempenho De Um Controlador Fuzzy Acoplado A Um Pid Neural Sintonizado Por Um Algoritmo Genético Com Controladores Inteligentes Convencionais**.2007. 73 f. - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007

WAURAJITTI, N., Ngamwiwit, J., e Prempraneerach, Y. **Adaptive fuzzy sliding mode controller for two cascaded tanks level control**. Em TENCON 2000, páginas 592 – 597,2000.